



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA BATERÍA IÓN-LITIO PARA EL**  
**VEHÍCULO PROTOTIPO FÓRMULA SAE DE LA CARRERA DE**  
**INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:** MARCO ANTONIO CRESPO ASANZA

ROBERTH ANDRÉS SÁNCHEZ MOROCHO

**DIRECTOR:** ING. CELIN ABAD PADILLA PADILLA

Riobamba – Ecuador

2023

**© 2023, Roberth Andrés Sánchez Morocho & Marco Antonio Crespo Asanza**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Marco Antonio Crespo Asanza y Roberth Andrés Sánchez Morocho, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 5 de diciembre de 2023



**Roberth Andrés Sánchez Morocho**

**C. I: 172772463-3**



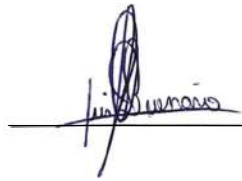


**Marco Antonio Crespo Asanza**

**C. I: 070700373-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **IMPLEMENTACIÓN DE UNA BATERÍA ION-LITIO PARA EL VEHÍCULO PROTOTIPO FÓRMULA SAE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ** , realizado por el señores: **MARCO ANTONIO CRESPO ASANZA** y **ROBERTH ANDRES SANCHEZ MOROCHO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-12-05
Ing. Celin Abad Padilla Padilla <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-12-05
Ing. Luis Fernando Buenaño Moyano <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-12-05

## **DEDICATORIA**

A mi padre, que desde muy chico me compartió el gusto por los autos y la pasión para hacer las cosas. Porque en la vida y en la cancha siempre hay que dejarlo todo. Para ti, viejo querido.

Marco

Dedico este trabajo a la amada memoria de mi querida abuelita Eumelia, cuyo amor, sabiduría y bondad siguen siendo una guía constante en mi vida. A mis padres NANCY MOROCHO Y HERNÁN SÁNCHEZ, mis incansables compañeros en este largo viaje, mis guías y ejemplo de perseverancia; gracias por creer en mí cuando dudaba de mis propias capacidades y por estar a mi lado brindándome amor, aliento y motivación. Son mis héroes, mi apoyo incondicional y mi mayor fortaleza. Gracias por ser unos padres excepcionales, sus sacrificios y esfuerzos han sido valiosos y sé que han trabajado duro para brindarme las oportunidades que han podido por cada logro que alcanzo es un reflejo del amor y dedicación que han puesto en mi desarrollo. A mi amada familia, su apoyo inquebrantable y fe en mí son un regalo invaluable. Su presencia y respaldo constante han sido fundamentales en mi camino. Con infinita gratitud, dedico este trabajo a la memoria de mi abuelita, a mis padres y a mi familia. Su amor y apoyo han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas.

Roberth

## AGRADECIMIENTO

Gracias a mi madre que en cada paso de este viaje estuvo apoyándome incondicionalmente con todo el amor que la caracteriza. A mi padre, por siempre ser ejemplo de trabajo duro, constancia y compromiso con la familia. A mis hermanos Luis y Juan Pablo y a mis abuelos que son pilar fundamental en mi crecimiento personal. A mi pareja y compañera, Sara Nicole, por darme la mano en cada momento y ser parte de mis logros. Agradezco también al Ing. Celín Padilla y al Ing. Luis Buenaño por todo el soporte brindado desde el primer día.

Marco

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL CHIMBORAZO, especialmente a la carrera de Ingeniería Automotriz, por el invaluable respaldo brindado durante mi formación académica. Los conocimientos adquiridos y la experiencia obtenida han sentado las bases para mi desarrollo profesional en el apasionante campo de la automoción. A mis padres Nancy Morocho y Hernán Sánchez, les debo un reconocimiento especial. Sus incansables esfuerzo, dedicación y amor incondicional han sido mi fuerza motriz y mi inspiración para superar cualquier obstáculo. Gracias por creer en mí y por impulsarme a alcanzar esta meta tan significativa en mi vida. Agradezco de manera especial a nuestro director de tesis, el Ing. Celín Abad, por su guía experta y su dedicación incondicional a lo largo de este proyecto. Así mismo al Ing. Luis Fernando Buenaño, nuestro asesor por su valioso aporte, dedicación y experiencia la cual ha sido vital para el desarrollo y éxito de este trabajo de grado. Por último, pero no menos importante, quiero extender mi gratitud a todas las personas que, de una u otra forma, estuvieron presentes, brindando su ayuda, aliento y ánimo en este proceso; sus palabras de estímulo y su apoyo incondicional han sido un combustible que me ha impulsado a dar lo mejor de mí en cada paso, a todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte de mi trayectoria académica y por contribuir de manera significativa a mi crecimiento personal y profesional.

Roberth

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. <b>DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA</b> .....	2
1.1. <b>Planteamiento del problema</b> .....	2
1.2. <b>Justificación</b> .....	3
1.3. <b>Objetivos</b> .....	3
1.3.1. <b>Objetivo general</b> .....	3
1.3.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	3

### CAPÍTULO II

2. <b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. <b>Estado del arte</b> .....	5
2.2. <b>Referencias teóricas</b> .....	6
2.2.1. <i>Baterías o acumuladores</i> .....	6
2.2.2. <i>Tipos de baterías</i> .....	7
2.2.2.1. <i>Baterías primarias</i> .....	7
2.2.2.2. <i>Baterías secundarias</i> .....	8
2.2.3. <i>Tipos de químicas de baterías existentes</i> .....	9
2.2.3.1. <i>Baterías de plomo-ácido</i> .....	9
2.2.3.2. <i>Níquel-Cadmio (NiCd)</i> .....	10
2.2.3.3. <i>Níquel-hidruro metálico (NiMH)</i> .....	11
2.2.3.4. <i>Baterías a base de litio</i> .....	12
2.2.4. <b>Cargador de baterías</b> .....	18
2.2.4.1. <i>Tipos de cargadores</i> .....	19
2.2.4.2. <i>Modos de carga</i> .....	19

2.2.5.	<i>Tipos de geometría de módulos existentes</i> .....	20
2.2.5.1.	<i>Celdas cilíndricas</i> .....	20
2.2.5.2.	<i>Celdas prismáticas</i> .....	21
2.2.5.3.	<i>Celdas Pouch o laminadas</i> .....	21
2.2.6.	<i>Sistema de Gestión de la Batería o Battery Management System (BMS)</i> .....	22

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	25
3.1.	<b>Diagrama de etapas del proyecto</b> .....	25
3.2.	<b>Metodología de la investigación a realizar</b> .....	25
3.3.	<b>Planificación o cronograma de actividades</b> .....	27
3.4.	<b>Recursos y materiales</b> .....	28
3.4.1.	<i>Materiales</i> .....	28
3.5.	<b>Equipos y herramientas</b> .....	28
3.6.	<b>Recursos humanos</b> .....	29
3.7.	<b>Desarrollo del proyecto</b> .....	30
3.7.1.	<i>Obtención de la pista en OL</i> .....	30
3.7.2.	<i>Caracterización del vehículo para la simulación en OL</i> .....	32
3.7.3.	<i>Obtención del ciclo de conducción a partir de OL</i> .....	33
3.7.4.	<i>Elaboración del modelo basado potencia para determinar el consumo energético</i> .	35
3.7.5.	<i>Dimensionamiento de las baterías a instalar en el prototipo</i> .....	39
3.7.6.	<i>Selección de batería</i> .....	44
3.7.6.1.	<i>Selección de la química de la batería</i> .....	45
3.7.6.2.	<i>Selección del tipo de celda de ion litio</i> .....	46
3.7.6.3.	<i>Selección de geometría de los módulos</i> .....	47
3.7.7.	<i>Selección de los módulos a implementar</i> .....	48
3.7.8.	<i>Simulación de cantidad de consumo energético con baterías escogidas</i> .....	50
3.7.9.	<i>Selección de Sistema de Gestión de la Batería (BMS)</i> .....	52
3.7.10.	<i>Construcción del contenedor de baterías</i> .....	54
3.7.11.	<i>Implementación de módulos en el vehículo de formula SAE</i> .....	56
3.7.11.1.	<i>Conexión en serie de los módulos</i> .....	56
3.7.11.2.	<i>Colocación de cables dirigidos al BMS en las baterías</i> .....	57
3.7.11.3.	<i>Instalación y anclaje de componentes en el chasis del prototipo</i> .....	59
3.7.11.4.	<i>Unificación de los elementos parte del sistema de alimentación (conexión)</i> .....	59
3.7.11.5.	<i>Conexión de sistema de alimentación con motor y sus componentes</i> .....	61



## CAPÍTULO IV

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>62</b>
<b>4.1.</b>	<b>Pruebas a realizar .....</b>	<b>62</b>
<b>4.1.1.</b>	<b><i>Pruebas de medición de voltajes.....</i></b>	<b>62</b>
<b>4.1.1.1.</b>	<i>Instrumentos usados para la medición de voltajes .....</i>	<i>62</i>
<b>4.1.2.</b>	<b><i>Prueba de consumo de accesorios del vehículo .....</i></b>	<b>63</b>
<b>4.1.2.1.</b>	<i>Instrumentos usados para la medir el consumo de los accesorios del vehículo .....</i>	<i>63</i>
<b>4.1.3.</b>	<b><i>Prueba de funcionamiento en movimiento .....</i></b>	<b>63</b>
<b>4.1.3.1.</b>	<i>Herramientas empleadas para la obtención de datos .....</i>	<i>64</i>
<b>4.1.3.2.</b>	<i>Ruta a circular por el vehículo .....</i>	<i>64</i>
<b>4.2.</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>65</b>
<b>4.2.1.</b>	<b><i>Resultados de pruebas de medición de voltaje .....</i></b>	<b>65</b>
<b>4.2.1.1.</b>	<i>Medición del voltaje individual de las celdas.....</i>	<i>65</i>
<b>4.2.1.2.</b>	<i>Medición del voltaje de cada módulo .....</i>	<i>66</i>
<b>4.2.1.3.</b>	<i>Medición del voltaje del pack de baterías .....</i>	<i>67</i>
<b>4.2.2.</b>	<b><i>Resultados de prueba de consumo de accesorios.....</i></b>	<b>67</b>
<b>4.2.3.</b>	<b><i>Resultados de prueba de funcionamiento en movimiento .....</i></b>	<b>68</b>
<b>4.2.3.1.</b>	<i>Primera vuelta por ruta .....</i>	<i>68</i>
<b>4.2.3.2.</b>	<i>Segunda vuelta por ruta .....</i>	<i>70</i>
<b>4.2.3.3.</b>	<i>Tercera vuelta por ruta.....</i>	<i>72</i>

## CAPÍTULO V

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>75</b>
<b>5.2.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>76</b>

## BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b>	Variedades de químicas a base de litio y sus propiedades .....	17
<b>Tabla 3-1:</b>	Tipos de metodologías a aplicar en base a objetivos.....	25
<b>Tabla 3-2:</b>	Cronograma de actividades .....	27
<b>Tabla 3-3:</b>	Materiales usados en el proyecto.....	28
<b>Tabla 3-4:</b>	Personas involucradas en el desarrollo del proyecto.....	30
<b>Tabla 3-5:</b>	Valores numéricos de las características del vehículo.....	41
<b>Tabla 3-6:</b>	Valores ingresados en el bloque correspondiente al inversor.....	42
<b>Tabla 3-7:</b>	Propiedades del motor instalado en el prototipo de Fórmula SAE.....	44
<b>Tabla 3-8:</b>	Contraste de las características a base de litio.....	46
<b>Tabla 3-9:</b>	Especificaciones de una celda LFP comercial.....	49
<b>Tabla 3-10:</b>	Variedades de BMS según su utilización .....	52
<b>Tabla 4-1:</b>	Valores de voltaje de celdas .....	66
<b>Tabla 4-2:</b>	Voltaje de los módulos individuales.....	67

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b>	Símbolo con que se representa una batería .....	6
<b>Ilustración 2-2:</b>	Proceso de descarga (a) y carga (b) de una batería .....	7
<b>Ilustración 2-3:</b>	Formas comerciales de baterías primarias.....	7
<b>Ilustración 2-4:</b>	Esquema de una batería.....	8
<b>Ilustración 2-5:</b>	Funcionamiento de una batería de plomo ácido .....	9
<b>Ilustración 2-6:</b>	Evolución de la composición interna de una batería de plomo ácido .....	10
<b>Ilustración 2-7:</b>	Efecto memoria en baterías .....	11
<b>Ilustración 2-8:</b>	Pack de baterías tipo NiMH .....	12
<b>Ilustración 2-9:</b>	Esquema del proceso de descarga de una batería de litio.....	13
<b>Ilustración 2-10:</b>	Estructura de LCO.....	13
<b>Ilustración 2-11:</b>	Estructura de Litio manganeso .....	14
<b>Ilustración 2-12:</b>	Baterías tipo NMC de geometría cilíndrica.....	15
<b>Ilustración 2-13:</b>	Estructura del cátodo de una batería LiFePO4.....	15
<b>Ilustración 2-14:</b>	Componentes internos de una batería LFP.....	16
<b>Ilustración 2-15:</b>	Parte interna de una celda cilíndrica.....	21
<b>Ilustración 2-16:</b>	Estructura de una celda prismática.....	21
<b>Ilustración 2-17:</b>	Interior de una celda laminada .....	22
<b>Ilustración 2-18:</b>	Esquema del Sistema de Gestión de la Batería .....	22
<b>Ilustración 2-19:</b>	Esquema de una arquitectura de BMS distribuida .....	24
<b>Ilustración 3-1:</b>	Diagrama de etapas del proyecto .....	25
<b>Ilustración 3-2:</b>	Datos referentes al circuito.....	31
<b>Ilustración 3-3:</b>	Circuito obtenido en librería de Optimum Lap .....	32
<b>Ilustración 3-4:</b>	Características del vehículo para realizar la simulación en Optimum Lap ..	32
<b>Ilustración 3-5:</b>	Ciclo característico de una vuelta con arranque.....	33
<b>Ilustración 3-6:</b>	Ciclo característico de una vuelta sin arranque .....	33
<b>Ilustración 3-7:</b>	Ciclo correspondiente a dos pasadas por pista .....	34
<b>Ilustración 3-8:</b>	Ciclo de conducción correspondiente a 22 vueltas por el circuito .....	34
<b>Ilustración 3-9:</b>	Esquema general del modelo para simulación .....	39
<b>Ilustración 3-10:</b>	Bloque correspondiente al ingreso de datos en el modelo .....	40
<b>Ilustración 3-11:</b>	Datos correspondientes a las características del neumático del vehículo.....	40
<b>Ilustración 3-12:</b>	Bloque pertinente a las características del vehículo .....	41
<b>Ilustración 3-13:</b>	Parámetros del bloque del inversor .....	42
<b>Ilustración 3-14:</b>	Resultados de la simulación .....	43

<b>Ilustración 3-15:</b>	Propiedades de las químicas existentes.....	45
<b>Ilustración 3-16:</b>	Celda prismática tipo LFP.....	48
<b>Ilustración 3-17:</b>	Bloque respectivo al cálculo dinámico.....	50
<b>Ilustración 3-18:</b>	Parámetros de batería.....	51
<b>Ilustración 3-19:</b>	Resultados finales de la simulación.....	51
<b>Ilustración 3-20:</b>	Consumo de SOC en la simulación.....	52
<b>Ilustración 3-21:</b>	BMS-ANT32S120A.....	53
<b>Ilustración 3-22:</b>	Zona de chasis para ubicación de contenedor de baterías.....	54
<b>Ilustración 3-23:</b>	Diseño de la base del contenedor de baterías.....	55
<b>Ilustración 3-24:</b>	Contenedor de baterías.....	56
<b>Ilustración 3-25:</b>	Proceso de conexión en serie de módulos.....	57
<b>Ilustración 3-26:</b>	Diagrama de conexiones a BMS.....	57
<b>Ilustración 3-27:</b>	Conexión en serie de módulos con sus respectivos cables para BMS.....	58
<b>Ilustración 3-28:</b>	Cableado conectado al BMS.....	58
<b>Ilustración 3-29:</b>	Sistema de contenedor y baterías montado en el vehículo.....	59
<b>Ilustración 3-30:</b>	Puerto hembra en contenedor de baterías.....	60
<b>Ilustración 3-31:</b>	Diagrama del sistema de alimentación.....	60
<b>Ilustración 3-32:</b>	Conexión entre contenedor de baterías y resto de componentes.....	61
<b>Ilustración 4-1:</b>	Multímetro digital DT9208A.....	62
<b>Ilustración 4-2:</b>	Pinza amperimétrica UNI-T UT204+.....	63
<b>Ilustración 4-3:</b>	Sistema de telemetría.....	64
<b>Ilustración 4-4:</b>	Ruta establecida para prueba.....	64
<b>Ilustración 4-5:</b>	Medición de voltaje de una celda de la batería.....	65
<b>Ilustración 4-6:</b>	Valor de voltaje de un módulo.....	66
<b>Ilustración 4-7:</b>	Voltaje total del acumulador.....	67
<b>Ilustración 4-8:</b>	Valores de consumo de amperaje.....	68
<b>Ilustración 4-9:</b>	Voltaje de primera pasada por pista.....	69
<b>Ilustración 4-10:</b>	Consumo de corriente en primera pasada.....	69
<b>Ilustración 4-11:</b>	Potencia consumida en primera pasada.....	70
<b>Ilustración 4-12:</b>	Voltaje de segunda vuelta por pista.....	71
<b>Ilustración 4-13:</b>	Consumo de corriente en segunda vuelta.....	71
<b>Ilustración 4-14:</b>	Potencia consumida en segunda pasada por pista.....	72
<b>Ilustración 4-15:</b>	Voltaje de tercera pasada por ruta.....	73
<b>Ilustración 4-16:</b>	Intensidad consumida en tercera pasada por pista.....	73
<b>Ilustración 4-17:</b>	Potencia empleada en tercera vuelta por ruta.....	74

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** CIRCUITO CORRESPONDIENTE AL SISTEMA DE PROPULSIÓN

## RESUMEN

El vehículo prototipo de Fórmula SAE propiedad de la Carrera de Ingeniería Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo actualmente no cuenta con una batería idónea para cumplir con los fines para los que este ha sido diseñado y construido, por lo que no puede ser considerado para competiciones de ninguna índole; por lo tanto, el objetivo primordial del siguiente trabajo técnico de titulación va encaminado al dimensionamiento e implementación de una batería de litio ferro-fosfato para el equipamiento oportuno de la unidad mencionada. La metodología implementada contó con varios procesos, empezando con la revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura disponible para contar con las bases teóricas suficientes para encarar el proyecto; luego, con la ayuda de software, se construyó una pista, se caracterizó un vehículo de características similares al prototipo, se obtuvo un ciclo de conducción y se elaboró un modelo matemático en el cual por medio de simulaciones serviría para determinar de forma precisa la cantidad de energía que el vehículo consumiría en pista. Con los valores conseguidos y teniendo en cuenta las características del motor de la unidad se adquirieron dos módulos que cumplían con los requerimientos energéticos obtenidos en la simulación y posteriormente se instalaron siguiendo las normas establecidas en la normativa oficial. Mediante esta metodología se pudo determinar que los acumuladores adquiridos para el vehículo cumplen con todos los requisitos para que el monoplaza sea tomado en cuenta para una competencia oficial ya que los voltajes cumplen con los requeridos por el motor y la capacidad energética supera a la obtenida mediante simulación. Finalmente, se concluye que las baterías ubicadas en el prototipo son idóneas para la unidad se capaz de sortear una prueba de resistencia en una competencia oficial, ya que la capacidad de estos excede la obtenida en las simulaciones realizadas.

**Palabras clave:** <INGENIERÍA AUTOMOTRIZ>, <FÓRMULA SAE>, <LITIO>, <SIMULACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO>, <CAPACIDAD ENERGÉTICA>.



## SUMMARY

The Formula SAE prototype vehicle owned by Automotive Engineering Career at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo does not currently have a suitable battery to meet the purposes for which it has been designed and built, so it cannot be considered for competitions of any kind; therefore, the primary objective of the following degree work is aimed at the sizing and implementation of a lithium ferro-phosphate battery for the timely equipment of the unit mentioned. The implemented methodology included several processes, starting with an exhaustive bibliographic review of the available literature in order to have enough theoretical bases to face the project; then, with the help of software, a track was built, a vehicle with similar characteristics to the prototype was characterized, a driving cycle was obtained and a mathematical model was elaborated in which by means of simulations would be used to determine precisely the energy amount that the vehicle would consume on the track. With the values obtained considering the characteristics of the unit's engine, two modules were acquired that met the energy requirements obtained in the simulation and subsequently they were installed according to the standards established in the official regulations. By means of this methodology it was determined that the accumulators acquired for the vehicle meet all the requirements for the single seater to be taken into account for an official competition, since the voltages comply with those required by the engine and the energy capacity exceeds that obtained through simulation. Finally, it is concluded that the batteries located in the prototype are suitable for the unit to be able to withstand an endurance test in an official competition, since their capacity exceeds that obtained in the simulations.

**Keywords:** <AUTOMOTIVE ENGINEERING>, <SAE FORMULA>, <LITHIUM>, <ENERGY CONSUMPTION SIMULATION>, <ENERGY CAPACITY>.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Sandra Paulina Porras Pumalema', written over a light blue grid background.

Lic. Sandra Paulina Porras Pumalema MSc.  
C.I. 0603357062

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de titulación va encaminado al dimensionamiento y posterior equipamiento del vehículo de Fórmula SAE propiedad de la Carrera de Ingeniería Automotriz con un pack de baterías de litio para que este cuente con una fuente de alimentación y propulsión para conseguir un buen rendimiento en las competencias SAE, para las cuales este se encuentra destinado. La necesidad de la implementación de una batería en el prototipo nace principalmente, ya que, en la actualidad, el vehículo monoplace carece de una fuente de energía, además, los acumuladores con los que fue equipado previamente cumplieron con un ciclo de vida útil mucho más corto de lo previsto; de esta forma, se busca implementar un sistema que sea capaz de cubrir las requerimientos y exigencias propios de circulaciones en ámbitos competitivos.

Para el desarrollo del proyecto se plantearon varios objetivos que debían ser cumplidos de forma concatenada para poder lograr sistemáticamente un buen desempeño en la consecución del mismo. Inicialmente, se revisó la bibliografía adecuada relacionada a vehículos tipo Fórmula SAE para conocer tanto las características, las normas y diseños a los que estos se rigen para competir. Una vez con el conocimiento suficiente respecto al tema abordado y con la ayuda de herramientas informáticas previamente estructuradas se simuló cantidades de consumo energético que presumiblemente realizaría el vehículo en condiciones de competencia. Ya con las cifras obtenidas, la elección de baterías se posicionó como una tarea menos compleja, ya que se debía contrastar características de las opciones existentes en el mercado nacional y se escogió la que mejor se adaptaba a las necesidades previas. Con el acumulador adquirido, las labores de equipamiento en el prototipo se pusieron en marcha para acto seguido poder realizar pruebas correspondientes al desempeño del vehículo en pista.

Los datos obtenidos de las pruebas sirvieron para contrastar desempeños del monoplace con baterías con las que anteriormente fue equipado y las baterías con las que actualmente se le suministró. Estas diferencias serán útiles tanto para el fin del trabajo presente, como para la consecución de proyectos futuros que vayan encaminados a la repotenciación y mejoramiento del sistema de alimentación energética del prototipo.



## **CAPÍTULO I**

### **1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA**

La Fórmula Student, también conocida como Fórmula SAE, es una competición en la que participan estudiantes de universidades e institutos superiores de todo el mundo. En esta competencia se promueven el diseño, construcción y desarrollo de vehículos monoplace inspirados en prototipos tipo Fórmula, fabricados con la implementación de diferentes tecnologías (Formula Student Germany 2023).

En este caso, el proyecto planteado responde a los prototipos con tecnología eléctrica. De esta forma, el tema de este proyecto pone en manifiesto el compromiso de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo juntamente con la Escuela de Ingeniería Automotriz a la proyección de una futura participación en una competición oficial de Fórmula SAE. Este objetivo trazado se llevará a cabo con el empleo tanto de los recursos disponibles en el territorio nacional como de los medios y herramientas provistos del extranjero; lo que ayudará a que los resultados alcanzados sirvan como guía y base para la realización de trabajos futuros.

Asimismo, una instalación idónea de componentes es clave en la consecución de objetivos, ya que de esta dependen los resultados a obtener. De esta forma, el sistema de alimentación del vehículo tiene un rol fundamental en el buen desempeño en pista del mismo, ya que, si este cuenta con unas buenas características y prestaciones, mejores serán los rendimientos que se obtengan.

#### **1.1. Planteamiento del problema**

Al momento el prototipo de Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz no se encuentra equipado con un sistema de alimentación que pueda satisfacer la demanda energética del vehículo, lo que impide que el mismo no sea tomado en cuenta para participaciones en competencias oficiales.

El rendimiento de un coche eléctrico depende principalmente de la cantidad energética que el controlador puede extraer de la batería. La batería de alto voltaje debe ser capaz de mantener el performance del vehículo durante toda la competencia, especialmente en un evento de Resistencia, el cual se ubica como el más exigente. Por lo tanto, la misma debe ser dimensionada acorde a los requerimientos de la pista y los atributos de vehículo; tales como el

peso y características del motor. Todo esto con el fin de evitar inconvenientes como la falta de autonomía o escasez de potencia en pista.

## **1.2. Justificación**

Este trabajo de titulación propone implementar una batería de Litio-Ferro fosfato (LFP) en el prototipo de Fórmula SAE propiedad de la institución para que este sea capaz de cubrir la demanda energética y satisfaga las exigencias propias de una competición oficial.

El evento en cuestión se posiciona como una competición automovilística y de ingeniería, cuyos inicios datan de 1981, entre universidades de todo el mundo, en la cual los equipos participantes deben ajustarse a una normativa impuesta por la Sociedad de Ingenieros Automotrices en la que se busca fomentar el conocimiento, el espíritu de equipo y la capacidad de creación (Roßmanek 2005).

Esta competencia cuenta con una serie de lineamientos tanto para vehículos con motores de combustión interna como para coches eléctricos, los cuales se deben cumplir a cabalidad para poder ser parte de esta.

En cuanto a vehículos propulsados eléctricamente, la reglamentación cuenta con una serie de parámetros a cumplir; los mismos que comprenden aspectos como seguridad, voltaje de operación, potencia máxima extraída del acumulador, peso, entre otros. De esta forma, todas las operaciones realizadas en el proyecto se verán ligadas al cumplimiento del reglamento existente. Para esto, las medidas a obedecer serán inspeccionadas y verificadas en el FSAE Rulebook.

## **1.3. Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo general***

Dimensionar e implementar una batería litio-ferro fosfato para el vehículo prototipo Fórmula SAE de la carrera de Ingeniería Automotriz.

### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Investigar en fuentes bibliográficas confiables los temas relacionados al dimensionamiento de baterías, tipos y características de los acumuladores de litio-ferro fosfato para los vehículos eléctricos mediante la revisión de la literatura disponible y el contraste entre fuentes para obtener una idea más clara y amplia del tema abordado.

- Dimensionar la batería a implementar basándose en cálculos y modelos matemáticos existentes para asegurar la autonomía del vehículo de Fórmula Student y cumplir con la normativa vigente de la Fórmula SAE.
- Dimensionar el acumulador a equipar por medio de simulaciones en un modelo de cálculo de consumo elaborado en el software Matlab para obtener datos concisos del desempeño de este en condiciones establecidas previamente.
- Analizar los elementos que van a conformar el sistema de alimentación del vehículo mediante la búsqueda y cotización de las mejores opciones existentes en el mercado para su posterior implementación en el vehículo.
- Realizar pruebas con el vehículo en movimiento mediante el establecimiento de una ruta específica para obtener resultados referentes a los parámetros cruciales de funcionamiento de las baterías con la ayuda del sistema de telemetría del prototipo.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Estado del arte

En el presente trabajo se realiza una investigación breve sobre la competencia referente a la Fórmula SAE y la implementación de baterías en base a ion-litio en los vehículos competidores en la misma. Se exponen las ventajas del equipamiento de este tipo de química tanto en autos eléctricos en general como en los monoplazas que parte de la categoría de eléctricos en la competición.

La competencia conocida como Fórmula SAE o Fórmula Student es la contienda ingenieril más grande a nivel mundial en el plano universitario. Esta competencia propone desafíos más allá del ámbito competitivo en pista, sino que, los equipos participantes tienen que velar porque variables como el diseño, planificación, costos, entre otros aspectos de los bólidos sean razonables y no se descuiden en el transcurso de la puesta en marcha de cada proyecto previo a una carrera (FORMULA STUDENT GERMANY 2023). Cuenta con tres modalidades de vehículos competidores según el modo de propulsión: vehículos con motores de combustión interna, vehículos híbridos y vehículos con propulsión puramente eléctrica. En el caso de los coche propulsados eléctricamente, también conocida como Fórmula Eléctrica, es una modalidad que cuenta con menor tiempo de implementación y busca que los contendientes se centren en la construcción de vehículos más amigables con el medio ambiente pero sin descuidar los aspectos de diseño, control y seguridad (Korobkov y Ufimtseva 2016).

Actualmente en el mundo, gracias a la gran cantidad de políticas encaminadas a promocionar el uso de vehículos que no empleen combustibles fósiles para su propulsión como alternativas amigables con el medio ambiente y con el objetivo de acortar significativamente el impacto climático que el sector del transporte tiene globalmente, se ha visibilizado que la industria de constructores de coches eléctricos ha experimentado un crecimiento exponencial respecto a la cantidad de automóviles de este tipo que circulan mundialmente; siendo que en el año 2021 la cifra de las unidades activas fue de 16,5 millones, tres veces más que en el año 2018 (Etxandi-Santolaya et al. 2023).

Aunque una producción en masa de vehículos eléctricos los haría muchos más accesibles en el mercado, se sabe que los vehículos que cuentan con estos sistemas de propulsión son entre 60%

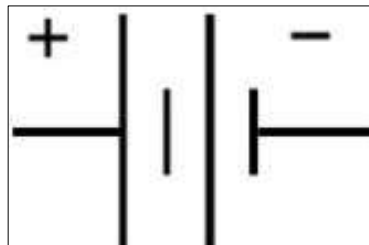
y 70% más eficientes que aquellos que están equipados con motores de combustión interna (Meah et al. 2020).

Respecto a las baterías con las que se equipan los vehículos se encuentran gran variedad de sistemas y químicas de las mismas. Particularmente, una elección favorable para la consecución de este trabajo son los acumuladores a base de ion-litio; específicamente las baterías que cuentan con fosfato de litio y hierro (LiFePO<sub>4</sub>) como material catódico ya que según (Zhao et al. 2022) su gran densidad energética, alta seguridad, gran número de ciclos de vida y costo relativamente bajo respecto a las prestaciones que ofrece colocan a esta química como una alternativa muy viable para la alimentación de coches eléctricos y en el mercado de venta de acumuladores.

## 2.2. Referencias teóricas

### 2.2.1. Baterías o acumuladores

Son dispositivos que se encargan de convertir la energía producida por reacciones químicas en energía eléctrica. Además, como su nombre lo sugiere, almacenan y proveen de energía al dispositivo en el que estén instaladas. Las reacciones ocurridas en el interior de las baterías pueden ser de tipo irreversibles (no recargables), en este caso se denominan baterías primarias; y de tipo reversibles (recargables), las cuales se denominan como baterías secundarias (Julien et al. 2015, pp.20-21)

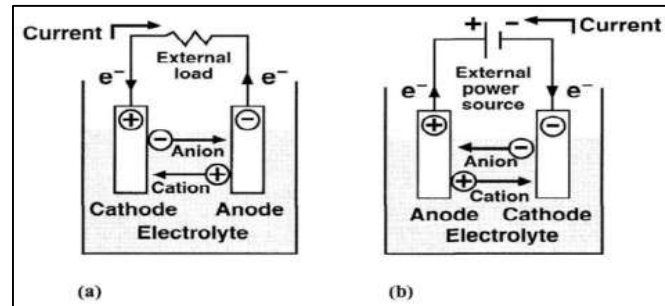


**Ilustración 2-1:** Símbolo con que se representa una batería

Fuente: (Buchman, 2016)

Poseen varios elementos fundamentales para su funcionamiento, pero entre los más importantes se destacan: el cátodo, el ánodo, el electrolito y el separador. El ánodo se define como el electrodo que cede electrones durante el proceso de descarga de la batería. El cátodo, por otro lado, es aquel electrodo que absorbe o recibe electrones a lo largo del procedimiento de descarga. En cuanto al electrolito, es aquel componente que hace posible el flujo de electrones

para que el desarrollo del proceso de descarga se concrete. Por último, el separador, como su nombre ya lo advierte, sirve como divisor entre el cátodo y el ánodo; aislando los electrones pero admitiendo el paso de los iones (Buchman, 2016, pp.52-53)



**Ilustración 2-2:** Proceso de descarga (a) y carga (b) de una batería

Fuente: (Pistoia, 2005, p.2)

### 2.2.2. Tipos de baterías

Como se había mencionado anteriormente, por la naturaleza de los procesos que se desarrollan en su interior, las baterías pueden ser de dos tipos:

#### 2.2.2.1. Baterías primarias

Se denominan baterías primarias a todas aquellas en las que en su interior sucede una reacción de tipo irreversible, es decir, que una vez aprovechada su energía esta no volverá a su estado inicial y no podrá ser recargada (Pistoia, 2005, p.33)

Son ampliamente utilizadas en lo referente a aplicaciones en las que se requiera una fuente de alimentación portátil y el proceso de carga sea poco práctico o imposible tal como en situaciones de combate militar o misiones de rescate. Representan el 80% de las ventas de baterías debido a sus características como bajo costo de adquisición, fiabilidad y la nula necesidad de mantenimiento (Pistoia, 2005, p.33)



**Ilustración 2-3:** Formas comerciales de baterías primarias

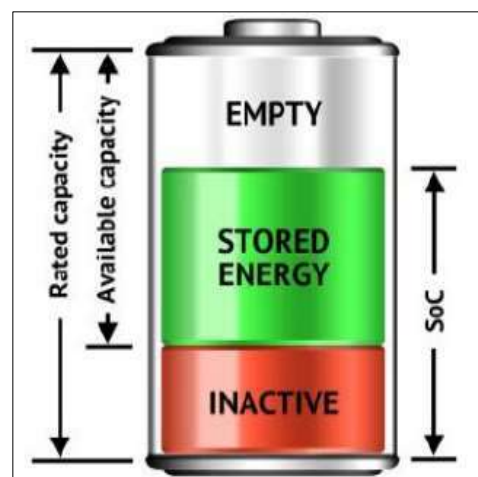
Fuente: (Buchman, 2016)

Su alta energía específica, rápida disponibilidad y extensos periodos de uso que estas permiten se presentan como las características más atractivas e importantes con las que estas baterías cuentan. Además, en muchos casos se encuentran fácilmente disponibles y son amigables con el ecosistema. El mejor ejemplo y el más popular de una batería primaria con las características descritas es la batería alcalina, la cual además de ser económica, es muy segura, se puede transportar vía aérea sin necesidad de estar sujeta a una norma estricta y se puede conservar almacenada hasta por un periodo de tiempo de 10 años (Buchman, 2016, p.57).

Aunque se pueden encontrar en una variedad de formas comerciales, la composición interna que estas ofrecerán también será diversas. Las opciones de químicas existentes de baterías primarias son: zinc carbón, alcalinas, disulfuro de hierro y litio, cloruro de tionilo de litio (LTC), dióxido de manganeso y litio (Li-M) y dióxido de azufre y litio (Buchman, 2016, pp.64-68)

#### 2.2.2.2. Baterías secundarias

También conocidas como baterías recargables, son aquellas en las que sucede una reacción química de tipo reversible, es decir, una vez que esta haya transformado toda la energía química para la cual fue diseñada y esta se agote, por un proceso inverso podrá volver a su estado inicial (Pistoia, 2005, p.14)



**Ilustración 2-4:** Esquema de una batería

Fuente: (Buchman, 2016)

En épocas contemporáneas, las baterías secundarias tienen un papel crucial en las vidas de las personas, a tal punto que sería impensable la realización de gran cantidad de tareas sin la ayuda de sus propiedades de recarga. Las opciones de químicas más comunes en cuanto a

acumuladores recargables se refiere son las siguientes: plomo ácido, níquel cadmio, níquel metal hidruro y ion de litio (Buchman, 2016, pp.68-69)

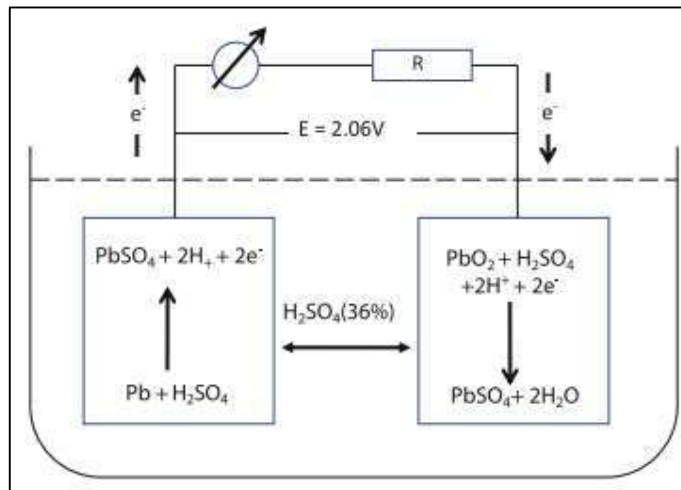
Para los fines del trabajo en curso, nos enfocaremos en detallar las características referentes a esta clase de baterías, tales como los tipos de químicas existentes, geometrías comerciales existentes, métodos de carga y sistemas de gestión de estas.

### 2.2.3. Tipos de químicas de baterías existentes

#### 2.2.3.1. Baterías de plomo-ácido

También llamadas baterías Pb-ácido, fueron presentadas por primera vez en el año 1860 y usadas para una gran cantidad de fines debido a su bajo costo, facilidad de manufactura y características electroquímicas propicias. Pese a que su invención se dio hace más de un siglo y medio, en la actualidad siguen siendo usadas y gozan de gran popularidad. (Huggins, 2010, p.37)

Están compuestas de un cátodo de dióxido de plomo, un ánodo de plomo de esponja metálica y una solución de ácido sulfúrico como electrolito. Esto hace que cuenten que con una energía específica de hasta 30Wh/Kg (Petrovic, 2021, p.17)



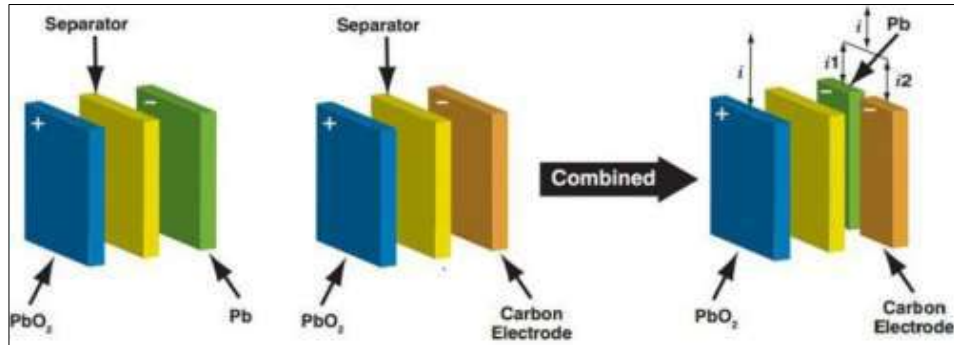
**Ilustración 2-5:** Funcionamiento de una batería de plomo ácido

Fuente: (Petrovic 2021)

En cuanto a la vida útil que las baterías de plomo ácido pueden ofrecer, esta varía según la profundidad de la descarga y puede llegar a rendir entre 200 y 300 ciclos de carga y descarga. La corrosión de la rejilla en el electrodo positivo, el consumo del componente activo y la dilatación de las láminas ubicadas en el polo positivo son las razones fundamentales por las que



este tipo de acumuladores no poseen un tiempo de vida más elevado, además, en temperaturas de funcionamiento y corrientes de descarga elevadas, esta degradación ocurre con mayor rapidez (Buchman, 2016, p.73)



**Ilustración 2-6:** Evolución de la composición interna de una batería de plomo ácido

Fuente: (Buchman, 2016)

### 2.2.3.2. Níquel-Cadmio (NiCd)

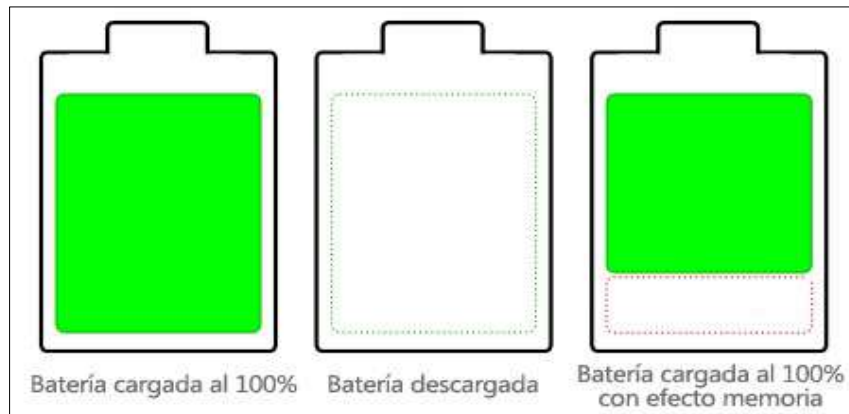
Se empezaron a construir en Europa en 1950 y no fue hasta 1990 que fue utilizada en dispositivos portátiles. Aunque cuentan con elevados costos de adquisición han aumentado su mercado desde salida al mercado y posterior popularización, sobre todo en los países desarrollados (Pistoia, 2005, pp.83-84)

Poseen un electrodo negativo de cadmio, un positivo de hidróxido de óxido de níquel y una solución alcalina como electrolito; cuentan con una energía específica de entre 40 a 60 Wh/kg y una densidad energética de 150 a 190Wh/L, considerablemente mayor que su antecesor (Pistoia, 2005, p.79)

La vida útil de estos dispositivos se ve considerablemente reducida cuando las descargas profundas son frecuentes. En caso de que la descarga profunda sea del 100%, se podrá conseguir alrededor de 700 ciclos de vida. Por otro lado, en cuanto a descargas que vayan hasta el 25% el número de ciclos asciende considerablemente hasta los 4000 (Pistoia, 2005, p.106).

Los radios de dos vías, equipos médicos de emergencia, cámaras de video usadas profesionalmente y herramientas eléctricas a lo largo de una gran cantidad de años fueron equipadas con baterías con esta química específica. Es hasta que en la última etapa de la década de 1980 se empezó a ubicar una mayor cantidad de material activo en las celdas, lo que aumentó la capacidad de estas hasta en un 60 por ciento que las baterías estándar; por otra parte, esta estrategia redujo su vida útil y aumentó la resistencia interna de las mismas (Buchman, 2016, p.85)

La baja energía específica en comparación con sistemas más actuales, el efecto memoria que sitúa a un proceso de descargas completas periódicas como una necesidad para mantener el buen rendimiento, la toxicidad del cadmio que es uno de sus elementos principales y predominantes, el gran coeficiente de auto descarga y el carente voltaje de 1,20 voltios por celda que hace que sean necesarias una gran cantidad de celdas en serie para alcanzar voltajes elevados son algunos de las limitaciones más marcadas con las que cuentan este tipo de acumuladores (Buchman, 2016, p.86)



**Ilustración 2-7:** Efecto memoria en baterías

Fuente: (Román Hernández 2008).

### 2.2.3.3. *Níquel-hidruro metálico (NiMH)*

Las exploraciones sobre el hidruro metálico de níquel iniciaron en el año 1967, pero no es hasta 1980 que, tras varios años de estudio, se logró resolver los problemas de inestabilidad provocados con esta mezcla. En lugar de este, se desarrolló y utilizó el hidruro de níquel (NiH). Actualmente, con los problemas de estabilidad completamente dilucidados, los sistemas NiMH son capaces de ofrecer 40% más energía específica que una batería estándar de NiCd (Buchman, 2016, pp.87-88)

También conocidas como baterías de níquel metal hidruro, comparten algunas características con las baterías de níquel-cadmio, pero poseen una mayor densidad energética, una vida útil más prolongada y son menos contaminantes que ya que no contienen cadmio. Cuentan con una capacidad de descarga mayor que las baterías que níquel-cadmio, un voltaje nominal de celda de 1,25 voltios y una baja tolerancia a la sobrecarga; lo que las vuelve más sensibles a las altas temperaturas (Pistoia, 2005, p.79)



**Ilustración 2-8:** Pack de baterías tipo NiMH

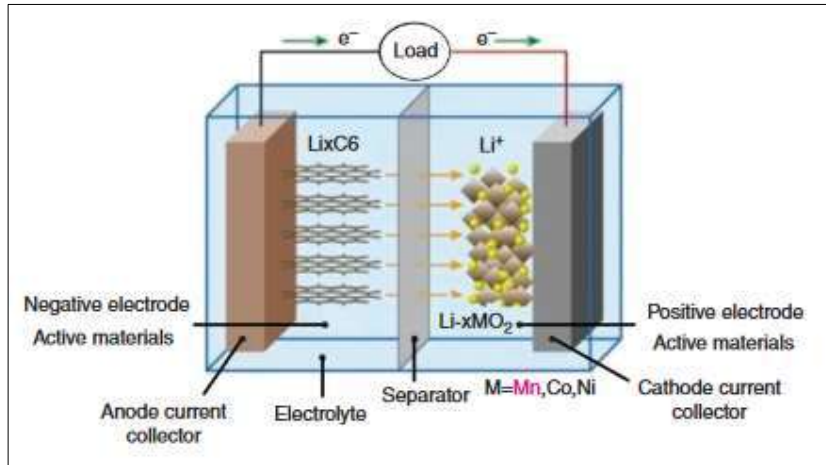
**Fuente:** (Sánchez Criado 2015)

Su alta energía específica hace que las aplicaciones más frecuentes de estos acumuladores sea en herramientas eléctricas de alto consumo y fines en los que el costo sea un rubro muy importante, teléfonos celulares, computadoras portátiles, cámaras de video, instrumentos de medición y equipos médicos (Pistoia, 2005, p.109)

A pesar de las ventajas mencionadas cuentan con varias limitaciones como una vida útil corta y condicionada a la cantidad de descargas profundas provocadas, el requerimiento de un complejo algoritmo de carga con una proclive sensibilidad a las sobrecargas, una baja absorción de la carga lo que se traduce en que la carga debe mantenerse lenta, un gran coeficiente de auto descarga y una eficiencia coulombica que únicamente alcanza el 65% (Buchman, 2016, p.89)

#### *2.2.3.4. Baterías a base de litio*

Los primeros trabajos referentes a la implementación de litio en las baterías tuvieron lugar en el año 1912, pero su lanzamiento comercial se produjo recién en la década de 1970. Desde aquel entonces este material se encargó posicionarse como la mejor alternativa ante los sistemas que utilizaban materiales como el plomo y el níquel. Aunque con un costo relativamente más alto comparado con otras químicas, los acumuladores que poseen compensan este rubro al contar con un número de ciclos de vida mayor y un menor requerimiento de mantenimientos. Se pueden encontrar en algunas variantes que están nombradas según los materiales activos con los que se encuentran equipados; estos materiales van desde el cobalto, manganeso, fosfato y titanio. Las denominaciones de los tipos de baterías a base de litio pueden ser por su nombre químico completo o por su contracción utilizando las iniciales de los componentes activos como por ejemplo el óxido de cobalto y litio cuyos símbolo químico es  $\text{LiCoO}_2$  y su abreviatura correspondiente es LCO (Buchman, 2016, pp.91-92)

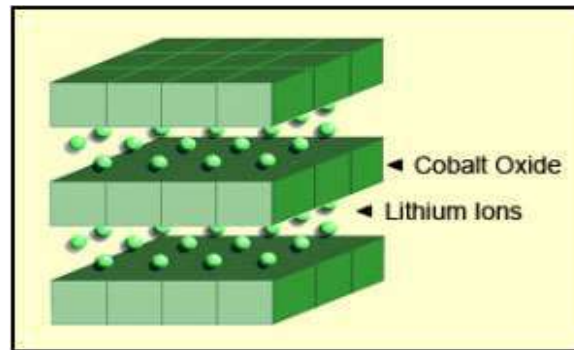


**Ilustración 2-9:** Esquema del proceso de descarga de una batería de litio

Fuente: (Jiang y Zhang 2015)

### Óxido de litio y cobalto (LiCoO<sub>2</sub>)

Están compuestas por un electrolito conformado por una solución de sal de litio disuelta en un solvente no acuoso, un cátodo de óxido de litio y cobalto y un ánodo que generalmente es de grafito. Son de un tamaño considerablemente menor que las baterías de níquel y poseen el doble de densidad energética (Tenelema Chano & Sánchez Lema, 2021, p.9)



**Ilustración 2-10:** Estructura de LCO

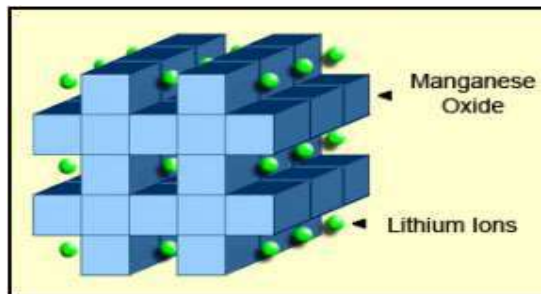
Fuente: (Battery University 2021)

Una celda LCO generalmente posee voltajes nominales que rondan los 3,60 voltios, una energía específica que está entre los 150 y 200 Wh/kg y un ciclo que vida que oscila entre 500 y 1000 ciclos de vida útil, lo que posiciona a este tipo de química como una variante con un tiempo de vida relativamente bajo. Además, rubros como la deficiente estabilidad térmica y la limitada capacidad de carga, hacen que se coloque como un tipo de batería que necesita un desarrollo más extenso (Buchman, 2016, pp.96-97).

Asimismo, su gran energía específica hace que las formas en las que se comercialicen este tipo de acumuladores sean de tamaño reducido. Es por esto que las aplicaciones más comunes de esta química específica son los dispositivos móviles como teléfonos celulares, tablets, laptops y cámaras digitales (Buchman, 2016, p.98)

### **Óxido de litio y manganeso (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)**

Publicadas por primera vez en el año 1983 y comercializado ya en el año 1996, las baterías con óxido de manganeso y litio en el cátodo, presentan una mejora en el flujo de electrones gracias a la forma tridimensional de su espinela; esto se traduce en una reducida resistencia interna, un manejo de la corriente más efectivo y una mayor estabilidad térmica, lo que las convierte en acumuladores con mayor seguridad al momento de su operación (Buchman, 2016, p.99).



**Ilustración 2-11:** Estructura de Litio manganeso

Fuente: (Battery University 2021).

Cuentan con valores de voltaje nominales de 3,70 voltios, energía específica que va entre los 100 y 150 Wh/kg y una vida útil que parte desde los 300 ciclos hasta los 700 ciclos. Son más seguras que sus antecesoras, las baterías LCO, y se las puede encontrar equipando herramientas eléctricas, instrumentos médicos e incluso vehículos híbridos y eléctricos (Buchman, 2016, pp.100-101).

### **Óxido de litio-níquel-manganeso y cobalto (LiNiMnCoO<sub>2</sub>)**

También conocidas como baterías NMC, por las siglas de sus componentes, se posicionan como uno de los más exitosos sistemas a base de litio debido a su combinación de manganeso, níquel y cobalto como los materiales predominantes en su cátodo. Cada uno de estos elementos posee debilidades de forma singular, pero combinados, potencian sus propiedades. El níquel, aunque tiene una estabilidad deficiente, también es conocido por contar con una gran energía específica; en el caso del manganeso, aunque cuenta con una baja energía específica, beneficia la unión al formar una estructura de espinela con la que consigue una resistencia interna reducida (Buchman, 2016, p.102).



**Ilustración 2-12:** Baterías tipo NMC de geometría cilíndrica

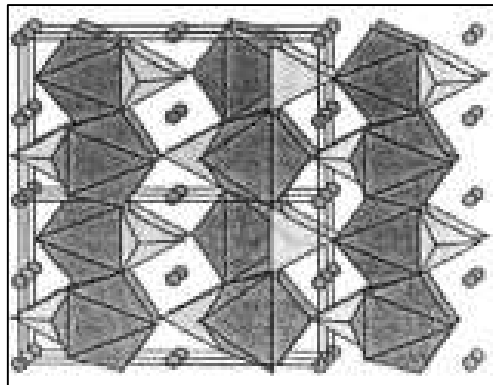
**Fuente:** (Power bigbadmole 2019)

Aunque la combinación de 5 partes de níquel, 3 partes de cobalto y 2 partes de manganeso se considera uno de los productos exitosos; su composición, conocida como 1-1-1, que cuenta con un tercio de níquel, un tercio de manganeso y un tercio de cobalto es la mezcla catódica típica de este tipo de acumuladores (Buchman, 2016, p.102).

Sus voltajes nominales van desde 3,6 voltios hasta 3,70 voltios, con una energía específica mínima de 150Wh/kg y una máxima de 220Wh/kg. Su tiempo de vida útil es relativamente más alto que las químicas LCO y LMO con valores que rondan entre los 1000 y 2000 ciclos de vida, lo que las coloca como muy buenas opciones para usos en dispositivos médicos, vehículos eléctricos y aplicaciones industriales (Buchman, 2016, p.103).

#### **Fosfato de litio y hierro (LiFePO<sub>4</sub>)**

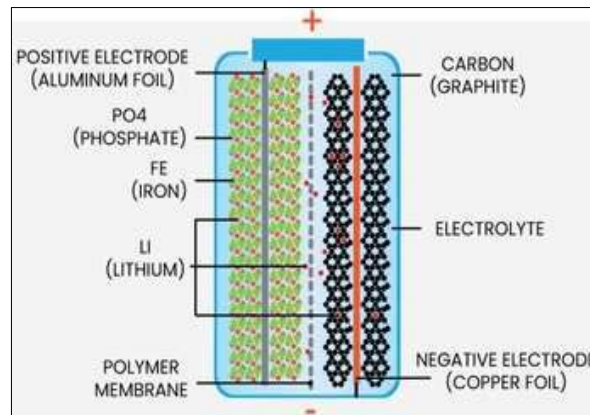
También conocidos como acumuladores de litio ferro fosfato o simplemente LFP, son baterías con un bajo impacto ambiental; cuentan con una capacidad de entre 90Wh/kg y 120Wh/kg y un voltaje nominal de alrededor de 3,20 a 3,30 voltios. Su cátodo, con una estructura fosfo-olivina, se perfila como prometedor para este tipo de pilas (Nazri y Pistoia, 2003, p.99)



**Ilustración 2-13:** Estructura del cátodo de una batería LiFePO<sub>4</sub>

**Fuente:** (Nazri y Pistoia 2003).

Mantienen una estructura similar a las baterías  $\text{LiCoO}_2$ , pero no usan cobalto, lo que les brinda una mayor estabilidad química y las hace mucho más seguras. Con un ciclo de vida que está entre los 1000 y 2000 ciclos, se ubican como una buena alternativa en ocasiones en las que se requieran altas corrientes de carga y durabilidad; en contraposición poseen una menor densidad energética y un costo de adquisición más elevado (Buchman, 2016, p.105)



**Ilustración 2-14:** Componentes internos de una batería LFP

Fuente: (García García 2022).

### Óxido de litio-níquel-cobalto y aluminio ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ )

Conocidas como NCA por las siglas de sus elementos, se encuentran en circulación desde el año 1999. Este tipo de baterías comparten algunas similitudes con las del tipo NMC ya que otorgan una energía específica alta, buena potencia específica y una vida útil considerable; aunque con aspectos menos favorables como la seguridad que ofrecen y el costo de las mismas (Buchman, 2016, p.105)

El voltaje nominal con el que cuentan estos acumuladores es de 3,60 voltios, la capacidad o energía específica se encuentra entre los 200Wh/kg y los 360Wh/kg y un tiempo de vida de 500 ciclos, una cantidad muy inferior en comparación con los otros tipos de baterías a base de litio; a pesar de esto, el fabricante americano Tesla las usa para equipar sus unidades. Por otro lado, los usos más comunes a los que se encamina esta química son a dispositivos médicos y aplicaciones industriales (Buchman, 2016, p.106)

### Titanato de litio

También llamadas baterías LTO como forma corta de su nomenclatura y se conocen desde la época de 1980. Cuentan con titanato de litio en el ánodo en reemplazo del grafito que convencionalmente se usa y en el cátodo materiales ya conocidos como pueden ser óxido de manganeso de litio o también óxido de níquel manganeso y cobalto (Buchman, 2016, p.107)

Generalmente son empleadas en sistemas de alumbrado de energía solar y conjuntos de propulsión eléctricos. Se consideran las más seguras de todas las baterías a base de litio y, por un gran margen de diferencia, tienen la vida útil más alta en esta categoría con una duración que va desde los 3000 a los 7000 ciclos. En contra parte, su energía específica es baja y se ubica entre los 70Wh/kg a 80Wh/kg y un voltaje nominal de 2,40 voltios (Buchman, 2016, p.108)

### Polímero de litio

Su diseño data del año 1970. Cuenta con una densidad energética mayor a las baterías anteriormente mencionadas, lo que se traduce a un diseño más ligero; además, un porcentaje de auto descarga menor. Se diferencian de sus antecesores principalmente porque en este tipo de baterías el electrolito actúa también como un separador y el mismo consiste en un material sólido de polímero conductor de iones de litio (Buchman, 2016, p.109)

Las ventajas principales de este sistema son su gran capacidad de carga combinada a una muy buena energía específica, su extendida vida útil propiciada por una gran cantidad de ciclos de duración, la baja resistencia interna, una buena eficiencia coulombica, materiales internos amigables con el medio ambiente y fáciles de reciclar, tiempos de carga moderadamente cortos y su mínimo coeficiente de autodescarga. En contraparte; la necesidad de circuitos de protección para evitar un descontrol térmico bajo condiciones de tensión, la imposibilidad de una carga rápida a temperaturas bajo cero y las estrictas normas que se deben seguir cuando se despachan grandes cantidades se encuentran como los puntos bajos en este tipo de sistemas (Buchman, 2016, p.111)

En el siguiente cuadro se hace un recuento de las características principales de las baterías a base de litio para poder establecer las diferencias más significativas entre estas variedades

**Tabla 2-1:** Variedades de químicas a base de litio y sus propiedades

Variantes de baterías a base de ion litio						
Nombre	Fórmula química	Abreviación	Energía específica (Wh/kg)	Voltaje nominal (V)	Ciclos de vida	Rendimiento
Titanato de litio	Li4Ti5O12	LTO	50-80	2,40	3000-7000	Una de las baterías más seguras
Óxido de manganeso	LiMn2O4	LMO	100-150	3,70	300-700	Elevadas cargas favorecen las



<b>litio</b>						pérdidas de rendimiento
<b>Óxido de litio-níquel-manganeso y cobalto</b>	LiNiMnCoO <sub>2</sub>	NMC	150-220	3,60-3,70	1000-2000	Carga elevada favorece pérdida de rendimiento
<b>Óxido cobáltico de litio</b>	LiCoO <sub>2</sub>	LCO	150-200	3,60	500-1000	Exceso de carga promueve pérdidas de rendimiento
<b>Óxido de aluminio de litio níquel y cobalto</b>	LiNiCoAlO	NCA	200-260	3,60	500	Cargas excesivas promueven pérdidas de rendimiento
<b>Fosfato férrico de litio o litio ferro fosfato</b>	LiFePO <sub>4</sub>	LFP	90-120	3,20-3,30	>2000	Segura incluso cuando está completamente cargada

Fuente: (Battery University 2021).

#### 2.2.4. Cargador de baterías

Es un dispositivo encaminado a proveer del voltaje óptimo a un banco de baterías para que estas a su vez, transmitan dicho voltaje al motor y este pueda propulsar el vehículo. Cuentan con un voltaje de carga específico según las especificaciones y requerimientos del pack de acumuladores usado (Tenelema Chano & Sánchez Lema 2021, p.11)

El uso de un cargador es de fundamental importancia para los vehículo propulsados eléctricamente, ya que estos al abastecer constantemente de energía a la planta motriz pierden gran cantidad de la misma y se necesita del abastecimiento constante para un correcto funcionamiento (Tenelema Chano & Sánchez Lema, 2021, p.11)

Para evitar el procedimiento de carga constante de las baterías, modelos actuales de unidades constan de controladores de motores que se encargan de realizar un proceso de recarga en el momento en que no se dispone de energía. Esta actividad se conoce como freno regenerativo (Tenelema Chano & Sánchez Lema, 2021, p.11)

Cada tipo de cargador, según la química a la que vaya encaminado, cuenta con particularidades propias. Los cargadores enfocados en las baterías de plomo y litio trabajan con una corriente y un voltaje constantes al momento de realizar el proceso de carga, es decir, que la corriente se suministra de forma constante hasta alcanzar un límite de voltaje previamente marcado; al alcanzar dicho límite la batería se colma, y la corriente desciende hasta que ya no admite carga y el proceso culmina. En el caso de la carga de acumuladores a base de níquel, este proceso se realiza con una intensidad constante y el voltaje aumenta de forma libre y finaliza al momento en que el sistema detecta una ligera caída en este (Buchman, 2016, p.200)

#### *2.2.4.1. Tipos de cargadores*

##### **Cargadores conductivos**

Se trata de un sistema que ocupa un cable y un conector para el vehículo. Estos pueden ubicarse tanto dentro como fuera del vehículo y cuentan con un flujo de energía tanto unidireccional como bidireccional (Pelletier, Jabali y Laporte 2014, p.7)

Un aspecto que limita el uso de este tipo de cargadores es la potencia requerida, ya que si se demanda niveles de potencia elevados también se va a necesitar cargadores de mayor tamaño. Esto implica más peso en el vehículo, mayor espacio para su ubicación y mayor costo debido al equipamiento que requieren (Pelletier, Jabali y Laporte, 2014, p.7)

##### **Cargadores inductivos**

Este método consiste en la transferencia de energía a la batería de forma magnética mediante la utilización de un cargador integrado, eliminando así el uso de elementos alámbricos como cables. De esta forma, la carga inductiva puede ser de tipo estacionaria, lo que refiere a una carga en la que el vehículo se encuentre detenido completamente; pero también puede ser de tipo inductiva a bordo, lo que significa que el proceso de carga se puede realizar con el vehículo en movimiento (Pelletier, Jabali y Laporte, 2014, p.9)

#### *2.2.4.2. Modos de carga*

Los modos de carga de una batería se diferencian en la rapidez con la que estos pueden devolver al acumulador el 100% de su capacidad nominal. Estos, además, se pueden categorizar según la cantidad de amperaje con la que operen en el curso del proceso. Así mismo, durante la carga de una batería se pueden combinar algunos procesos para obtener mejores resultados (Bergveld, Krijt y Notten, 2002, p.189).

Otro factor del cual depende la rapidez de la carga de una batería es el tasa-C o también conocido como coeficiente de descarga C. Esta se refiere a la velocidad con la que un acumulador puede cargarse o descargarse y está en función de la capacidad de una batería (Buchman, 2016, p.208).

Modo de carga lenta: Es el modo más básico en cuanto a carga de un dispositivo se refiere ya que, además, de tardar entre 14 y 16 horas para completar una carga íntegra, los dispositivos relacionados con esta forma de recarga no cuentan con elementos de detección de carga completa. Asimismo, la tasa de descarga C es una décima parte de la capacidad nominal, es decir, una tasa de 0,1C (Bergveld, Krijt y Notten, 2002, p.189).

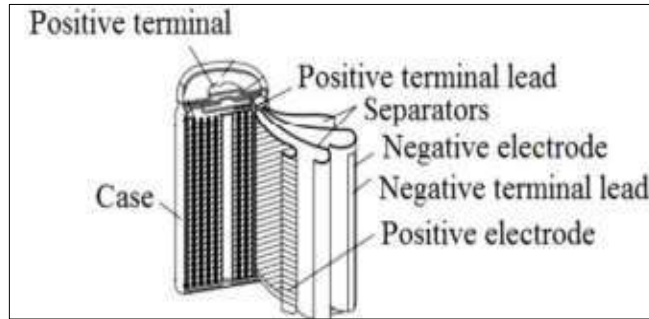
Modo de carga intermedio: Como su nombre lo sugiere, este modo de carga se encuentra entre el modo de carga lenta y el modo de carga rápida. También conocido como *rapid charging*, es un procedimiento capaz de realizar una carga completa de una batería en un rango de tiempo de 3 a 6 horas. La tasa-C correspondiente a este modo es de 0,3C (Buchman, 2016, p.201).

Modo de carga rápido: Este modo de carga opera a una tasa de descarga C de la batería de 1C, lo que se traduce que el tiempo máximo de carga completa de un acumulador es poco más de una hora dependiendo de las condiciones de sus condiciones. Esto hace que el sistema precise de una comunicación mucho más estrecha entre el dispositivo cargador y la batería (Buchman, 2016, p.202).

## **2.2.5. Tipos de geometría de módulos existentes**

### **2.2.5.1. Celdas cilíndricas**

Este tipo de celdas son las formas más comunes de construcción tanto de baterías primarias como de baterías secundarias. Son fáciles de conseguir en el mercado debido a su bajo costo. Pueden soportar grandes presiones sin perder su forma, esto hace que cuenten con una buena estabilidad mecánica. Las aplicaciones más comunes a las que este tipo de geometría va encaminada son a la energización de herramientas eléctricas, instrumentos médicos, computadores portátiles y en ocasiones bicicletas eléctricas (Buchman, 2016, p.149).

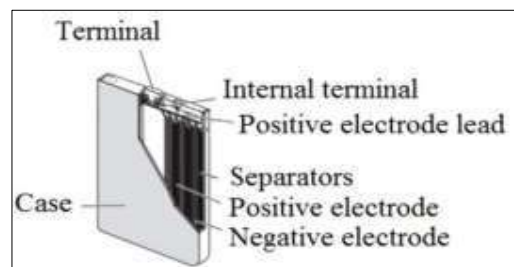


**Ilustración 2-15:** Parte interna de una celda cilíndrica

Fuente: (Wang et al. 2016).

### 2.2.5.2. Celdas prismáticas

Esta clase de celda fue introducida en el mercado en la década de 1990. Su forma ayuda a optimizar el espacio disponible y brinda mayor flexibilidad al momento de acoplar varias celdas para la formación de un módulo o pack. Difiere de las celdas cilíndricas al tener un costo más elevado y una vida útil más corta. Se pueden hallar en dos formatos: celdas prismáticas pequeñas y celdas prismáticas grandes. Las celdas pequeñas se encuentran generalmente en teléfonos móviles, tabletas y computadoras portátiles con capacidades desde los 800mAh hasta los 4000mAh. Las celdas prismáticas de formato grande, que vienen empaquetadas en cubiertas de aluminio soldado, son capaces de entregar capacidades des hasta 50Ah y son usadas para equipar vehículos eléctricos e híbridos (Buchman, 2016, p.154).



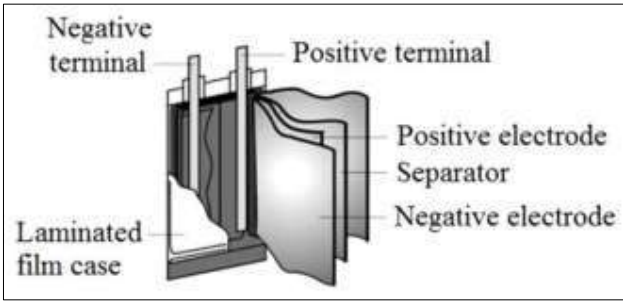
**Ilustración 2-16:** Estructura de una celda prismática

Fuente: (Wang et al. 2016).

### 2.2.5.3. Celdas Pouch o laminadas

Presentadas en el año 1995 y revolucionando a la industria con su novedoso diseño, las celdas laminadas admiten aprovechar de forma óptima el espacio en la construcción de una batería con varias celdas debido a su menor peso y forma compacta. A pesar de esta ventaja, las altas

temperaturas en procesos de carga o descarga pueden lograr que estas se hinchen y pierdan sus características muy rápidamente (Buchman, 2016, p.155).



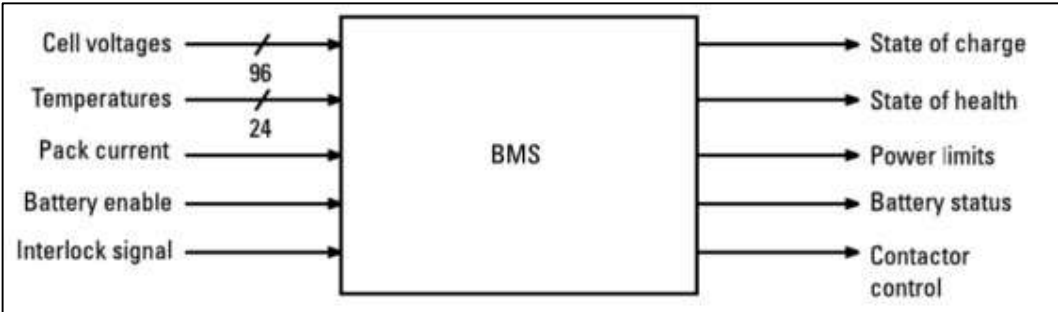
**Ilustración 2-17:** Interior de una celda laminada

Fuente: (Wang et al. 2016)

**2.2.6. Sistema de Gestión de la Batería o Battery Management System (BMS)**

La tarea fundamental de este sistema es controlar la óptima utilización de la energía disponible en la batería y minimizar al máximo los riesgos ocasionados a la misma en caso de un problema o contratiempo (Chuquimarca Tandazo & Suin Uyaguari, 2017, p.16)

Conocido generalmente como BMS por sus siglas en inglés, está encargado de computar tres parámetros básicos en la batería y de esta forma determinar el estado en el que se encuentra la misma. Estos parámetros son: voltaje concerniente a cada una de las celdas, flujo de corriente que circula por la batería y temperatura de las celdas. Los datos recogidos por el Sistema de Gestión de la Batería son interpretados por la misma y utilizados tanto para controlar los procesos de carga como de descarga y de esta forma evitar que la batería funcione en rangos inseguros y así mismo prevenir procesos destructivos para su vida útil (Chuquimarca Tandazo & Suin Uyaguari, 2017, p.16)



**Ilustración 2-18:** Esquema del Sistema de Gestión de la Batería

Fuente: (Weicker 2014)

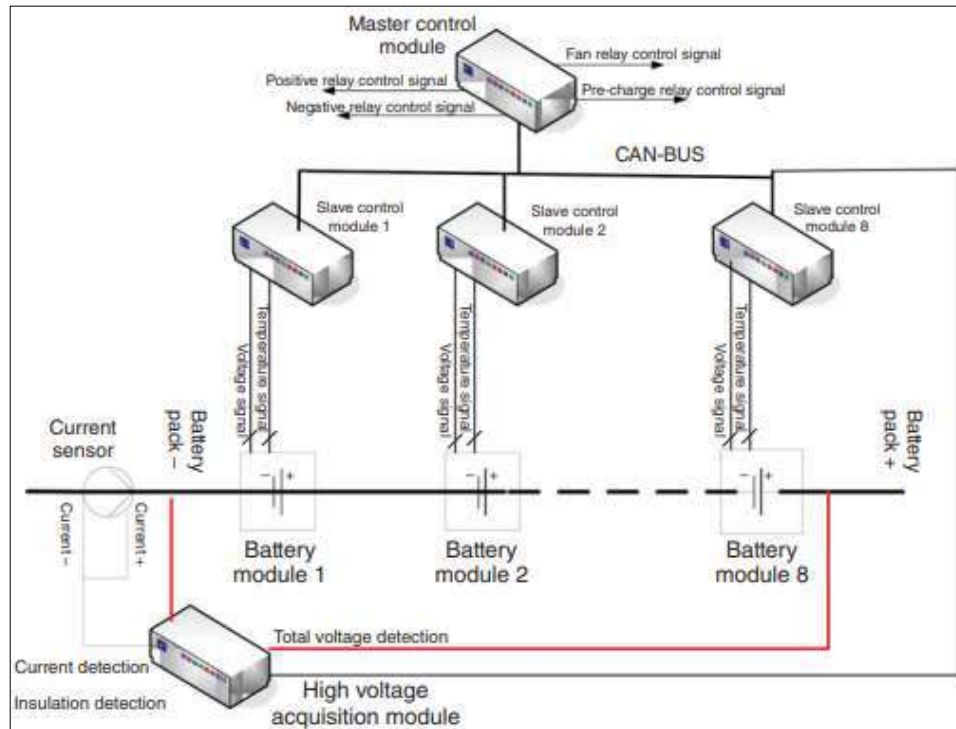
En la actualidad existen gran cantidad de BMS que cuentan con diversas funciones según su diseño, especificaciones de trabajo, requerimientos y complejidad. En algunos casos únicamente están encargados de monitorear las condiciones de la batería y calcular los datos de rendimiento, en otros casos, estos cuentan con una mayor complejidad ya que poseen una gran cantidad de sistemas integrados y entradas adicionales que son capaces de llevar un control en parámetros como temperatura, accionamiento de ventiladores y bombas así como de dispositivos encaminados a mantener la temperatura de la batería dentro de los rangos ideales (Weicker, 2014, p.57)

El Sistema de Gestión de la Batería se encarga de procesar la información que recibe de los diferentes elementos a los que está conectado para luego ejecutar acciones encaminadas al control y monitoreo para conservar la batería en un estado de funcionamiento estable y seguro. Posteriormente las salidas que este otorga son un estado de carga, estado de salud, límites de potencia, estado general de la batería y, en caso de haber defectos, establece correctivos por medio de sus contactores (Chuquimarca Tandazo & Suin Uyaguari, 2017, p.17)

En cuanto a la construcción del Sistema de Gestión de la Batería, se pueden distinguir dos tipos de arquitecturas: la arquitectura centralizada y la arquitectura distribuida. En lo que respecta a la arquitectura centralizada, esta cuenta con funciones principales de la BMS como son la medición de voltaje, temperatura, corriente, resistencia de aislamiento, entre otras. Se conoce como centralizada ya que precisa de puntos de sondeo concentrados, lo que hace que presente como principales ventajas una conexión sencilla, un bajo costo y un mantenimiento accesible; en contraparte, esto también se presenta como una desventaja, ya que en los vehículos actuales, al necesitar una mayor cantidad de baterías contando con poco espacio no se puede centralizar el control de las mismas por lo que se distribuyen en áreas diversas, lo que hace que gradualmente se vaya descontinuando la utilización de sistemas de tipo centralizados en vehículos eléctricos (Jiang y Zhang, 2015, p.245).

En el caso de una arquitectura distribuida de un BMS, esta cuenta con dos unidades fundamentales como los son Unidad de Control de la Batería (BCU por sus siglas en inglés) y la Unidad de Medición de la Batería (BMU también por sus siglas en inglés). La Unidad de Control de la Batería (BCU) se encarga principalmente de procesar los parámetros medidos por la BMU para estimar estado de carga (SOC), estado de energía (SOE), estado de salud (SOH) y estado de funcionamiento (SOF) de la batería. La Unidad de Medición de la Batería (BMU) es generalmente usada para realizar mediciones de voltajes y temperaturas individuales de las celdas de las baterías, el voltaje total, la corriente, la resistencia de aislamiento y receptor las órdenes de la BCU. Se considera una arquitectura más eficiente ya que permite optimizar el

espacio y la flexibilidad en el diseño, además, debido a que poseen dos unidades, esta puede prevenir interferencias en las líneas de alto y bajo voltaje (Jiang y Zhang, 2015, p.247).



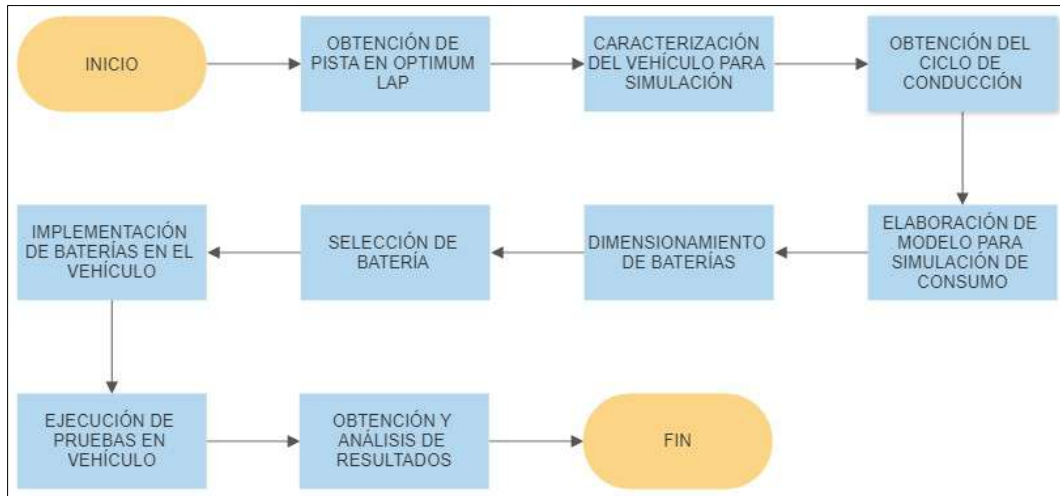
**Ilustración 2-19:** Esquema de una arquitectura de BMS distribuida

Fuente: (Jiang y Zhang 2015)

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Diagrama de etapas del proyecto



**Ilustración 3-1:** Diagrama de etapas del proyecto

Realizado por: Crespo & Sánchez ,2022

#### 3.2. Metodología de la investigación a realizar

Para el desarrollo del proyecto se partió del análisis minucioso de los objetivos específicos, esto permitió que se planteen preguntas que servirán como instrumento para la determinación de la metodología correcta a aplicar, así como técnicas e instrumentos a ocupar. Seguidamente, se indica una tabla referente a la metodología que detalla los aspectos mencionados.

**Tabla 3-1:** Tipos de metodologías a aplicar en base a objetivos

Objetivos	Preguntas	Metodología	Técnicas	Instrumentos
Investigar en fuentes bibliográficas confiables los temas relacionados al dimensionamiento de baterías, tipos, y características de los acumuladores de litio-ferrofosfato para los vehículos eléctricos mediante	¿Qué son las baterías usadas en vehículos eléctricos? ¿Qué tipo de baterías se usan en vehículos eléctricos? ¿De qué materiales están construidas las baterías usadas	Revisión de fuentes bibliográficas disponibles aplicando el método deductivo.	Búsqueda y recolección de información.	Artículos científicos. Libros digitales y físicos. Tesis doctorales y de pregrado. Revistas científicas.



la revisión de la literatura disponible y el contraste entre fuentes para obtener una idea más clara y amplia del tema abordado	en vehículos eléctricos? ¿Cuál es el tipo de batería que puede propiciar el mayor rendimiento para la aplicación deseada?			
Dimensionar la batería a implementar basándose en cálculos y modelos matemáticos existentes para asegurar la autonomía del vehículo Fórmula Student y cumplir con la normativa vigente de la Fórmula SAE	¿Cuál es la normativa a seguir? ¿Qué herramienta tecnológica se puede usar para el establecimiento de un modelo matemático? ¿Qué parámetros debe cumplir la batería a dimensionar?	Revisión de la normativa vigente de la Fórmula SAE. Revisión de bibliografía referente a dimensionamiento de baterías.	Búsqueda y recolección de información.	Ordenador Software Matlab Normativa de FSAE actualizada.
Dimensionar el acumulador a equipar por medio de simulaciones en un modelo de cálculo de consumo elaborado en el software Matlab para obtener datos concisos del desempeño del mismo en condiciones establecidas previamente	¿Qué capacidad deben tener los acumuladores a equipar en el prototipo? ¿Cuáles son los aspectos límites de los acumuladores estipulados en el reglamento?	Revisión de las capacidades y características de los elementos que forman parte del sistema de tracción del prototipo	Búsqueda de información de los trabajos previamente realizados en el vehículo	Ordenador Software Matlab
Analizar los elementos que van a conformar el sistema de alimentación del vehículo mediante la búsqueda y cotización de las mejores opciones existentes en el mercado para su posterior implementación en el vehículo	¿Cuál es la mejor opción de baterías que se puede encontrar en el mercado? ¿La química a implementar en el vehículo se adapta a las necesidades del proyecto? ¿Qué medidas de seguridad se deben seguir para	Revisión de medidas de seguridad para manipular baterías de alto voltaje Cotización de productos existentes en el mercado nacional Comunicación con proveedores de productos	Razonamiento inductivo mediante el contraste entre opciones existentes	Ordenador Teléfono celular

	la instalación de los componentes?			
Realizar pruebas con el vehículo en movimiento mediante el establecimiento de una ruta específica para obtener resultados referentes a los parámetros cruciales de funcionamiento de las baterías con la ayuda del sistema de telemetría del prototipo	¿Qué tipo de pruebas se va a realizar? ¿Qué aspectos favorables se pueden destacar de las pruebas realizadas? ¿Qué parámetros se pueden mejorar?	Método experimental	Recorrido de pista establecida	Sistema de telemetría del prototipo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.3. Planificación o cronograma de actividades

**Tabla 3-2:** Cronograma de actividades

ID	Nombre de la tarea	Fecha de inicio	Fecha de finalización
1	Búsqueda de fuentes bibliográficas	26/9/2022	14/10/2022
2	Dimensionamiento del pack de baterías en función de las necesidades	17/10/2022	28/10/2022
3	Análisis y selección de componentes a utilizar según la reglamentación para el montaje de las baterías del prototipo	31/10/2022	11/11/2022
4	Acoplamiento de los módulos de baterías seleccionados según el dimensionamiento	14/11/2022	18/11/2022
5	Pruebas y medición del estado de las baterías	21/11/2022	25/11/2022
6	Montaje del pack de baterías en el prototipo	28/11/2022	23/12/2022
7	Pruebas de funcionamiento en ruta del prototipo y recolección de datos de las pruebas realizadas	2/1/2023	6/1/2023
8	Análisis de los datos recolectados	9/1/2023	20/1/2023

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.4. Recursos y materiales

#### 3.4.1. Materiales

**Tabla 3-3:** Materiales usados en el proyecto

Material	Especificación	Descripción
Pletina	Plenita de cobre de 1/8 x 3/4	Utilizada para obtener placas pequeñas que servirán como uniones para realizar la conexión en serie de las celdas de los módulos
Broca	Broca para metal de 1/4 de diámetro	Elemento usado para el mecanizado de agujeros en las placas de cobre
Pernos	Pernos de ¼	Empleados para la sujeción de las láminas o placas de cobre en los terminales de las celdas de las baterías
Llaves	Juego de llaves milimétricas	Para realizar el ajuste y desajuste de pernos
Cables	1 metro de cable cero	Cable robusto ocupado para la conexión entre módulos
Fusible	Fusible de 100 amperios	Miembro protector del sistema en caso de sobrevoltajes y fallos
Terminales	Terminales aislados ojo #22-18	Elementos colocados en los extremos del cable para un mejor acople
Cortadora de cables	Remachadora multiuso de electricista	Herramienta para cortar y quitar revestimiento de cables
Cautín	Equipo eléctrico para soldar	Aparato empleado para realizar la soldadura de elementos eléctricos
Estaño	Material para realizar uniones	Componente empleado como material de aporte en las uniones soldadas de partes eléctricas

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.5. Equipos y herramientas

En el desarrollo del proyecto los elementos y herramientas que se van a utilizar son diversos; empezando por herramientas de medición, ordenadores, equipos de medida para componentes eléctricos hasta instrumentos para ajuste y desajuste.

Para el génesis del trabajo, en lo concerniente al dimensionamiento, las herramientas principales a utilizar serán las de índole informática, tales como un ordenador que cuente con el software

Excel. Esta nos proveerá de útiles para poder ejecutar los cálculos y cómputos de forma más sencilla y rápida.

Otro elemento de carácter informático es el software Optimum Lap, el cual nos permite realizar simulaciones a partir de características específicas de vehículos y pistas para de esta forma obtener datos concernientes al rendimiento de los automotores en un entorno específico. Esta herramienta es de gran utilidad ya que nos alcanza datos fieles a la realidad para poder ensamblar de forma precisa un ciclo de conducción en una carretera con condiciones determinadas.

Una vez armado un ciclo de conducción específico procedemos a ingresar todos los datos en Matlab, particularmente en la herramienta Simulink. Esta, contará con un modelo matemático previamente realizado y luego, en base a los resultados obtenidos en Optimum Lap, nos aproximará el comportamiento del vehículo y establecerá consumos energéticos que posteriormente deberán cumplir las baterías.

Ya que la reglamentación pertinente expresa que las baterías deben ir colocadas en un contenedor, los elementos usados para este fin serán plancha metálica de 0,90 milímetros para las paredes y la tapa y plancha de 2 milímetros para el piso. Este contenedor irá fijado a la estructura principal del vehículo y para esta operación se necesitarán herramientas manuales como taladro, sierra, amoladora, remachadora y cizalla para poder dar forma y ubicarlo en el lugar correspondiente.

Al momento tanto de realizar el montaje de los módulos de baterías en el monoplaça como al de realizar las pruebas, será necesario el uso de un ordenador. La utilidad de este en el primer caso, es para realizar la programación pertinente al BMS o sistema de monitoreo de las baterías; para este fin, también serán necesarios instrumentos de medición como multímetro y pinza amperimétrica. Respecto a las pruebas del vehículo en movimiento, el ordenador irá monitoreando parámetros como la velocidad y la distancia recorrida para al final brindarnos los datos respectivos para hacer el análisis de los mismos.

### **3.6. Recursos humanos**

Para la buena consecución de un proyecto es necesario el trabajo mancomunado de las partes que pretenden llevarlo a cabo, por esto, una buena administración de recursos tanto humanos como económicos es parte fundamental del mismo.

Durante el desarrollo del proyecto se vieron envueltas varias personas, las cuales contaban con roles y funciones distintas, cada una de fundamental importancia para el mismo. A continuación, se detallan con mayor rigurosidad las tareas que las personas involucradas en el propósito desarrollaban.

**Tabla 3-4:** Personas involucradas en el desarrollo del proyecto

<b>Roles</b>	<b>Ocupación</b>	<b>Encargados</b>
Investigador	Revisar fuentes bibliográficas fiables para la recopilación de información referente al proyecto a realizar. Gestionar el desarrollo del trabajo en todas las etapas correspondientes. Presentar informes concernientes a avances del proyecto en curso	Roberth Sánchez Marco Crespo
Planificador	Establecer los parámetros puntuales acerca de cómo se realizará el trabajo de titulación. Fijar fechas para la realización de actividades planteadas. Adquirir los materiales necesarios para materialización del proyecto planteado.	Roberth Sánchez
Desarrollador	Llevar a cabo todas y cada una de las actividades planteadas con anticipación en la etapa de planificación para poder cumplir con los objetivos dispuestos.	Roberth Sánchez Marco Crespo
Revisión y aprobación	Solicitar informes referentes al avance del trabajo y sus respectivas evidencias. Brindar sugerencias en favor de la mejora de la elaboración del proyecto. Revisar cuidadosamente los detalles del trabajo en curso.	Ing. Celín Padilla Ing. Luis Buenaño
Consultoría externa	Cooperar con aspectos relacionados a la parte técnica y de construcción del proyecto. Contribuir con herramientas especiales para la constitución del trabajo. Colaborar con sugerencias en base a experiencia en el campo laboral para poder desarrollar el trabajo con mayor claridad.	Dexter Electronics

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### **3.7. Desarrollo del proyecto**

#### **3.7.1. Obtención de la pista en OL**

Para la realización de la pista se usó el software Optimum Lap ya que este cuenta con herramientas para la diseño, creación y simulación de circuitos y tramos de forma virtual.

Además, al momento de ejecutar una simulación con un vehículo este nos ofrece dos configuraciones de recorrido de pista distintos: una configuración de circuito abierto en la que los vehículos partirán con una velocidad inicial ascendente similar a un arranque y otra configuración de circuito cerrado en la que no contempla un arranque desde el reposo.



The image shows a software window titled "Circuito de Resistencia". It is divided into two main sections: "TRACK INFO" and "TRACK ADJUSTMENTS".

**TRACK INFO**

- Track Type:** A dropdown menu set to "Permanent Circuit".
- Track Name:** A text box containing "Circuito de Resistencia".
- City:** A text box containing "Riobamba".
- Country:** A text box containing "Ecuador".

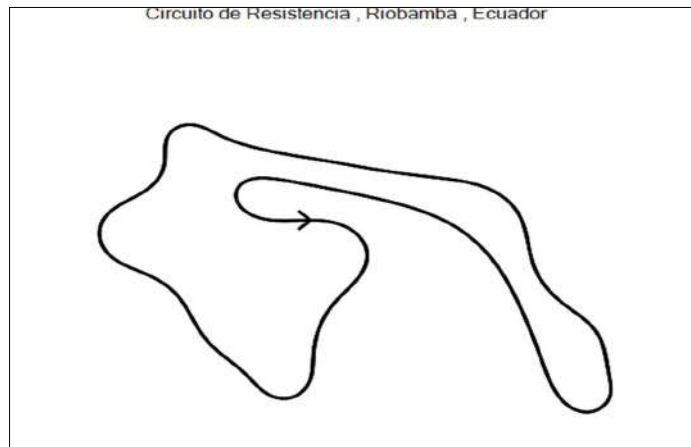
**TRACK ADJUSTMENTS**

- Track Direction:** A dropdown menu set to "Forward Direction".
- Track Configuration:** A dropdown menu set to "Closed Circuit".

**Ilustración 3-2:** Datos referentes al circuito

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

El circuito necesario para la simulación posterior se obtuvo de la librería del programa en base a los requerimientos establecidos en el reglamento pertinente. La pista cuenta con una distancia total de 1045 metros de extensión con varias curvas, rectas y horquillas. A través de esta los vehículos, se desplazarán en repetidas ocasiones hasta completar los 22 kilómetros de recorrido que la normativa contempla para completar un evento de resistencia.

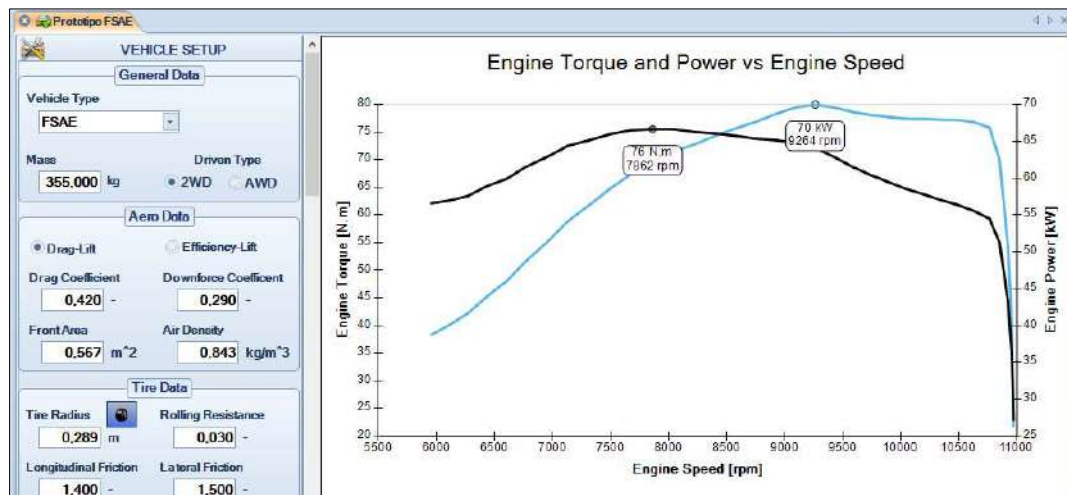


**Ilustración 3-3:** Circuito obtenido en librería de Optimum Lap  
 Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.2. Caracterización del vehículo para la simulación en OL

Para poder obtener un ciclo de conducción característico en la pista diseñada, se precisaba de un vehículo que pudiera recorrer la misma y que contara con características similares a las de un auto de la competencia. Por esto, ayudándose en las herramientas que el programa ofrece, se configuró un vehículo de prestaciones similares al prototipo propio.

Los parámetros ajustados en la determinación del auto van desde su masa, área frontal, coeficiente de arrastre hasta el radio dinámico de sus ruedas.



**Ilustración 3-4:** Características del vehículo para realizar la simulación en Optimum Lap  
 Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.3. Obtención del ciclo de conducción a partir de OL

Una vez que las características del vehículo y la pista fueron establecidas y configuradas de acuerdo a los requerimientos, se procedió a realizar la simulación pertinente a una vuelta para poder establecer el ciclo de conducción característico.

Para simulación de la primera pasada en el circuito, la configuración de la pista fue del tipo abierto para poder obtener la velocidad más baja en los primeros metros de recorrido y que esta vaya aumentando gradualmente avanza. Esta, respondió a los datos de la primera vuelta obtenida en la simulación, esta se ejecutó en 50,14 segundos con una velocidad final de 87,376 kilómetros por hora y se colocó como punto de partida del siguiente ciclo.



**Ilustración 3-5:** Ciclo característico de una vuelta con arranque

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Ya con la simulación de la primera vuelta por la pista concluida, se precisó de los datos correspondientes a una pasada nueva por la pista, pero esta vez sin necesidad de un arranque del vehículo. Esto significaría que la velocidad final del ciclo anterior sería la velocidad inicial del nuevo ciclo.

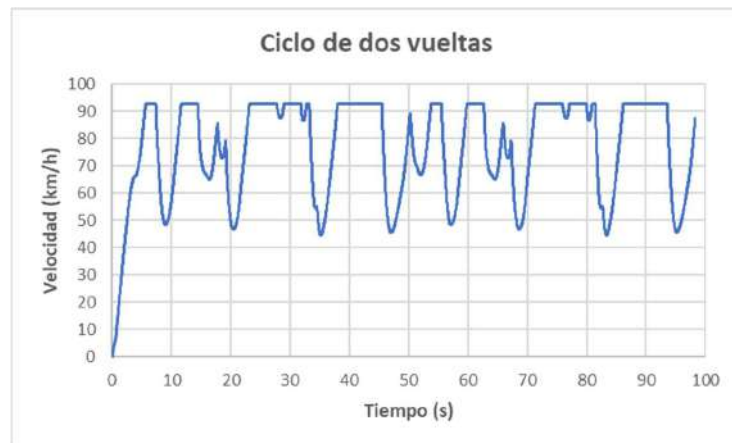


**Ilustración 3-6:** Ciclo característico de una vuelta sin arranque

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.



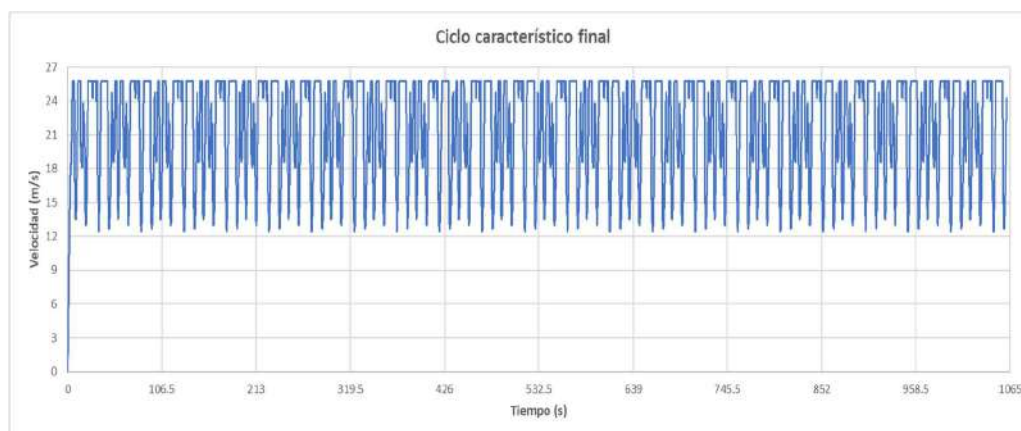
La siguiente pasada por la pista, ya sin arranque, se llevó a cabo en un tiempo de 48,14 segundos y como velocidad inicial y final contó con 87,376 kilómetros por hora; para poder obtener datos acumulados de estas dos pasadas por pista, debido a que el programa así lo permitió, se sumó el tiempo con el que concluyó la primera vuelta a todos los datos de tiempo de la segunda pasada para así poder construir un ciclo acorde a la simulación de dos vueltas por el circuito.



**Ilustración 3-7:** Ciclo correspondiente a dos pasadas por pista

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Finalmente, para poder completar el ciclo característico que responda al recorrido total de la pista trazada, se procedió a concatenar los datos correspondientes a la segunda pasada, ya que cada uno representaba una vuelta individual por el circuito. Para esto, se sumó el tiempo acumulado de cada vuelta anterior a dicha pasadas hasta completar 22 recorridos por el mismo. El resultado final y ciclo característico de la pista fue el siguiente:



**Ilustración 3-8:** Ciclo de conducción correspondiente a 22 vueltas por el circuito

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Al finalizar el recorrido total del circuito, la extensión global que virtualmente recorrió el vehículo es de 22,99 kilómetros ya que, como es bien conocido, la longitud total con la que el circuito cuenta es de 1045 metros. Todo esto en un tiempo acumulado de 17,685 minutos (1061,1094 segundos) y una velocidad máxima de 92,13 kilómetros por hora.

#### **3.7.4. *Elaboración del modelo basado en la potencia para determinar el consumo energético***

Ya con el ciclo característico correspondiente a 22 pasadas por la pista obtenida, se procedió a elaborar un modelo matemático para que a partir de dicho ciclo se pueda establecer la cantidad de energía que el vehículo esbozado previamente consumiría.

La elaboración de dicha herramienta tomó como guía el trabajo previamente realizado por (Buenaño et al. 2022) dentro la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, específicamente por el grupo de investigación de Sistemas Alternativos de Propulsión e Impacto Ambiental (SAPIA) de la institución y consiste en un modelo con el cual, entre otros aspectos, se puede determinar con precisión la energía consumida en una ruta establecida. Dicha obra está realizada en el software Matlab y su herramienta específica Simulink; la cual está encaminada al modelado, simulación y análisis de sistemas dinámicos. Este trabajo de investigación fue validado anteriormente por sus autores por medio de contrastes entre resultados de simulaciones del modelo propio y datos provenientes de la Autoridad de Tránsito de Antelope Valley (AVTA) respecto a consumos energéticos; proceso en el que no se obtuvieron errores porcentuales que no sobrepasaron el 10% (Buenaño et al. 2022).

Una forma habitual de determinar consumos energéticos de vehículos de propulsión eléctrica es con el uso de expresiones matemáticas que relacionen parámetros tales como velocidad, aceleración, pendiente, inercia y propiedades físicas del vehículo; esta estrategia nos permitirá determinar la demanda de potencia del auto en cada momento y se puede calcular por medio de la ecuación (1) (Alegre Buj, 2017, p.94)

$$P_x = F_x * v \left[ \frac{Nm}{s} \right] \quad (Ec. 1)$$

Donde:

$P_x =$  Potencia en rueda

$F_x =$  Fuerza de tracción [N]

$v =$  Velocidad del vehículo  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

En conformidad con (Wong 2001), para el cálculo de las fuerzas de tracción se puede usar la siguiente expresión:

$$F_x = \gamma_m * m * a + \sum R \text{ [N]} \quad (Ec. 2)$$

Donde:

$\gamma_m =$  Factor de masa

$\Sigma R =$  Fuerzas que se oponen al movimiento

Para (Buenaño et al. 2022) el factor de masa puede estimarse de la siguiente manera:

$$\gamma_m = 1,04 + 0,0025 * \xi_0^2 \text{ [-]} \quad (Ec. 3)$$

Donde  $\xi_0$  se presenta como la relación de reducción global de transmisión del vehículo, la cual, para la generalidad de los coches eléctricos es de marcha fija.

De acuerdo con (Cordero Moreno, 2015) y (Korobkov y Ufimtseva 2016), en el caso de las fuerzas que se oponen al movimiento se cuenta con:

- **Fuerza de arrastre ( $F_d$ )**

$$F_d = \frac{1}{2} * \rho_a * C_d * A * v^2 \text{ [N]} \quad (Ec. 4)$$

Donde:

$\rho_a =$  Densidad del aire  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$C_d =$  Coeficiente de arrastre

$A =$  Area frontal del vehículo  $[m^2]$

Además, la densidad del aire puede obtenerse a partir de:

$$\rho_a = \frac{P}{R * T} \quad (Ec. 5)$$

En la que:

$P =$  Presión atmosférica  $[Pa]$

$R =$  Constante universal de los gases  $= 286,9 \left[\frac{J}{kg * K}\right]$

$T =$  Temperatura  $[K]$

- **Resistencia gravitacional ( $R_g$ )**

$$R_g = M * g * \sin(\theta) \text{ [N]} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

$M =$  Masa del vehículo  $[kg]$

$g =$  Valor de la gravedad  $= 9,81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\theta =$  Valor de la pendiente  $[rad]$

- **Resistencia a la rodadura ( $R_x$ )**

$$R_x = fr * M * g * \cos(\theta) [N] \quad (Ec. 7)$$

Donde:

$fr$  = Coeficiente de resistencia a la rodadura

$$fr = 0,0136 + 0,40 \times 10^{-7} * v^2 [-]$$

Conjuntamente, y en concordancia con (Buenaño et al. 2022), se consideraron las siguientes ecuaciones para el modelo:

$$d = \int_0^t v dt [m] \quad (Ec. 8)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (Ec. 9)$$

Con las expresiones mostradas previamente y con la ayuda de Simulink se generó un modelo para la obtención de variables como distancia global recorrida por el vehículo a lo largo del circuito, la aceleración y la potencia para cada momento de tiempo. Todas estas en base a las entradas como velocidad, pendiente y la relación de reducción global de la transmisión que en el caso del vehículo representado era un valor constante de 3,615 ya que el mecanismo de transmisión de movimiento es por medio de una cadena que va desde una rueda dentada proveniente del motor hasta el diferencial.

Debido a que el movimiento del vehículo es considerado como un evento que provoca la descarga de la fuente de alimentación energética del mismo, según (Gao et al. 2017) se puede usar la siguiente fórmula para calcular la potencia de descarga de esta:

$$P_{dch} = P_{acc} + \frac{P_x}{\eta_{wh} * \eta_{fd} * \eta_{mot} * \eta_{bat}} [W] \quad (Ec. 10)$$

Ecuación en la cual:

$P_{dc}$  = Potencia de descarga

$P_{acc}$  = Potencia de accesorios

$\eta_{wh}$  = Eficiencia del neumático

$\eta_{fd}$  = Eficiencia de la transmisión

$\eta_{mot}$  = Eficiencia del motor

$\eta_{bat}$  = Eficiencia de la batería

En el caso de la potencia de los accesorios se tomará en cuenta como un valor nulo debido a que el vehículo no cuenta con elementos que consuman una cantidad considerable de energía y esta, al menos de forma teórica, irá destinada únicamente al movimiento del prototipo.

Para el cálculo de la potencia de carga, según el autor (Buenaño et al. 2022), se puede considerar la siguiente ecuación para obtener este valor:

$$P_{ch} = |P_x| * \eta_{wh} * \eta_{fd} * \eta_{mot} * \eta_{bat} - P_{acc} [W] \quad (Ec. 11)$$

Donde:

$P_{ch}$  = Potencia de carga

La salida de estos parámetros de simulación constituye la potencia de operación, la cual se puede formular como la diferencia entre la potencia de descarga y la potencia de carga. El trabajo de (Fiori, Ahn y Rakha 2016) lo propone de la siguiente forma:

$$P_{ope} = P_{dch} - P_{ch} [W] \quad (Ec. 12)$$

Otro factor que se tomó en cuenta en la elaboración del modelo de potencia para la simulación del vehículo fue el estado de carga (SOC) de la batería del mismo. Este refleja la cantidad de energía que dispone la batería del coche en un momento.

Para proteger y extender el rendimiento de la batería a lo largo del tiempo, las mismas deben estar en un rango de funcionamiento que esté entre el 20% y el 95% de su estado de carga (Buenaño et al. 2022).

La determinación del estado de carga de una batería, según (Fiori, Ahn y Rakha 2016), se realiza por medio de la siguiente fórmula:

$$SOC = SOC_{ini} - \frac{\int_0^t (P_{ope} + Ch_{fst}) dt}{C_{bat}} [\%] \quad (Ec. 13)$$

Donde

$SOC_{ini}$  = Estado de carga inicial

$Ch_{fst}$  = Potencia de carga rápida

$C_{bat}$  = Capacidad de la batería [kWh]

En concordancia con (Fiori, Ahn y Rakha 2016), la determinación del consumo de energía de un vehículo eléctrico puede realizarse de por medio de la siguiente ecuación:

$$C_E = \frac{1}{3600} * \left( \int_0^t (P_{ope} + Ch_{fst}) dt \right) * \frac{1}{d} \left[ \frac{kW}{km} \right] \quad (Ec. 14)$$

Donde:

$C_E$  = Consumo energético

$d$  = Distancia total recorrida

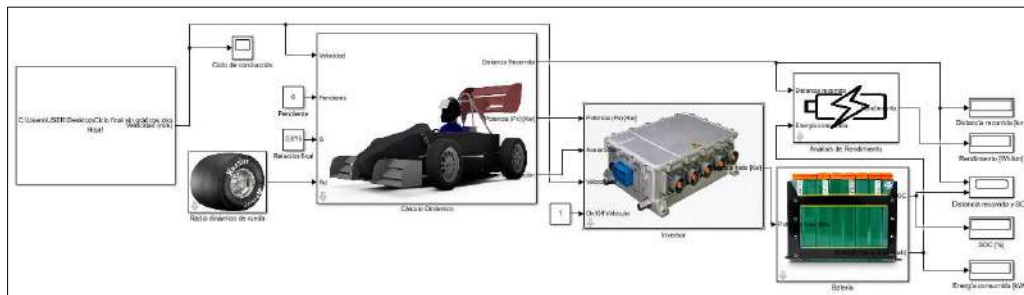
De igual forma, otro rubro de trascendente importancia es la obtención de la demanda energética del vehículo en pista durante las múltiples pasadas por el circuito. Para esto, se contó con la siguiente ecuación del autor (Fiori, Ahn y Rakha 2016):

$$D_E = \frac{1}{3600000} * \left( \int_0^t (P_{ope} + Ch_{fst}) dt \right) [kWh] \quad (Ec. 15)$$

Donde:

$D_E =$  Demanda energética

La ilustración 3-9 presenta el modelo final que se elaboró en Simulink con el fin de obtener la cantidad de energía consumida por un vehículo en un circuito determinado. Esta herramienta no sólo nos permite obtener el consumo energético en ruta, sino también la distancia total transitada, el estado de carga con el que concluye el tramo y la demanda de energía que requiere para completar el recorrido.



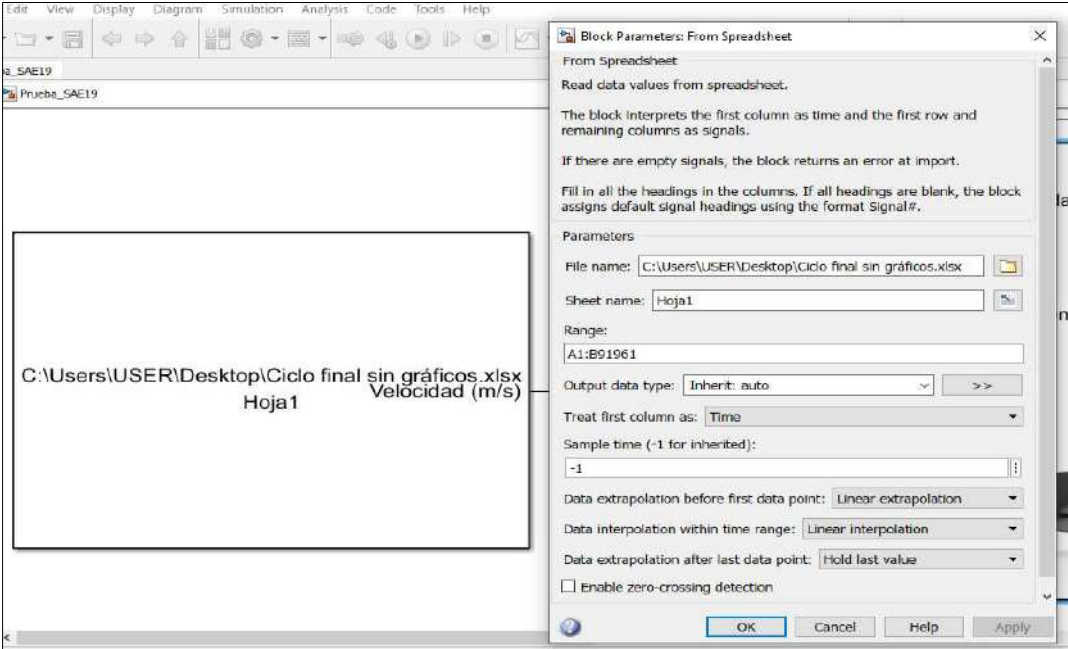
**Ilustración 3-9:** Esquema general del modelo para simulación

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.5. Dimensionamiento de las baterías a instalar en el prototipo

Una vez que se obtuvo el circuito que cuenta con condiciones similares a las que ofrece una prueba de resistencia de la competencia oficial, se bosquejó un vehículo de características equivalentes al prototipo al que se va a equipar y se modeló en Simulink la herramienta para la aproximación del consumo energético del vehículo, se procedió a ingresar tanto los datos de tiempos y velocidades desempeñados en la simulación previa en Optimum Lap en pista así como los datos correspondientes a las características vehículo en el modelo. Estos parámetros ayudaron a obtener información concreta que sirvió como pauta para la elección de la batería y las prestaciones con las que debía contar la misma.

Inicialmente, se ingresaron los datos correspondientes al ciclo total que comprendía 22 pasadas a la pista. Estos fueron obtenidos de la simulación en Optimum Lap en forma de hoja de cálculo de Excel y se colocaron directamente en la herramienta Spreadsheet en el modelo.



**Ilustración 3-10:** Bloque correspondiente al ingreso de datos en el modelo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

El ingreso de la hoja de cálculo ayudó a que el programa pueda reconocer el ciclo de conducción con el que se iba a desarrollar la simulación.

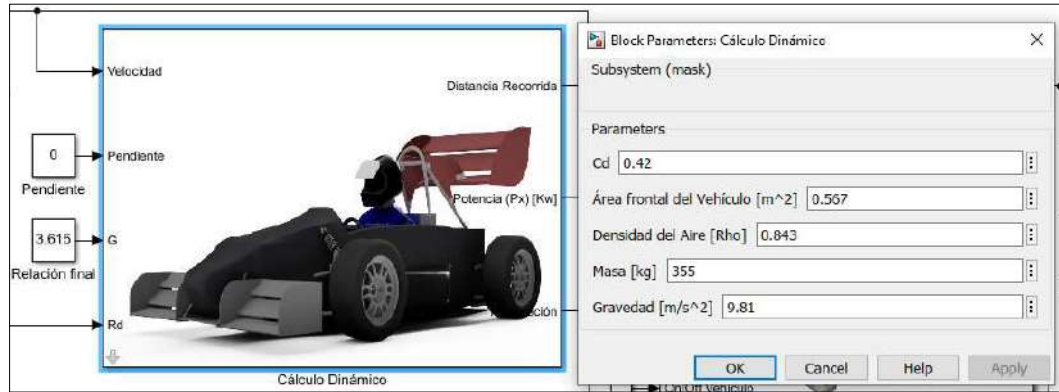
Debido a que el vehículo cuenta con un neumático 185/60R14, los valores colocados en el parámetro respectivo al radio dinámico de la rueda fueron un ancho del neumático igual a 185 milímetros, un alto en porcentaje de 60% y diámetro interior de la rueda de 14 pulgadas.



**Ilustración 3-11:** Datos correspondientes a las características del neumático del vehículo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Seguidamente del ingreso de los datos referentes al radio dinámico de la rueda, se colocaron las características del vehículo tales como: relación de transmisión final, coeficiente aerodinámico del vehículo, masa total, área frontal; así como factores externos como la densidad del aire y el valor constante de la fuerza gravitacional.



**Ilustración 3-12:** Bloque pertinente a las características del vehículo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Como se puede observar en la ilustración 3-12 en los parámetros correspondientes a pendientes y relación final se colocaron valores constantes. En el caso de la pendiente, se colocó un valor de cero porque se tomó en cuenta un terreno completamente plano debido a que las competencias cuentan con terrenos de estas características. En lo que respecta a la relación de transmisión final, al contar con un piñón conductor de 13 dientes y una rueda conducida de 47, se concluyó que su valor es de 3,615:1.

Los parámetros de coeficiente de arrastre y área frontal cuentan con valores de 0,42 y 0,567, respectivamente; debido a que fueron establecidos previamente en trabajos realizados en el prototipo.

En cuanto al valor de la masa total, después de realizar el proceso de pesaje del vehículo se ubicó una cifra de 355 kilogramos.

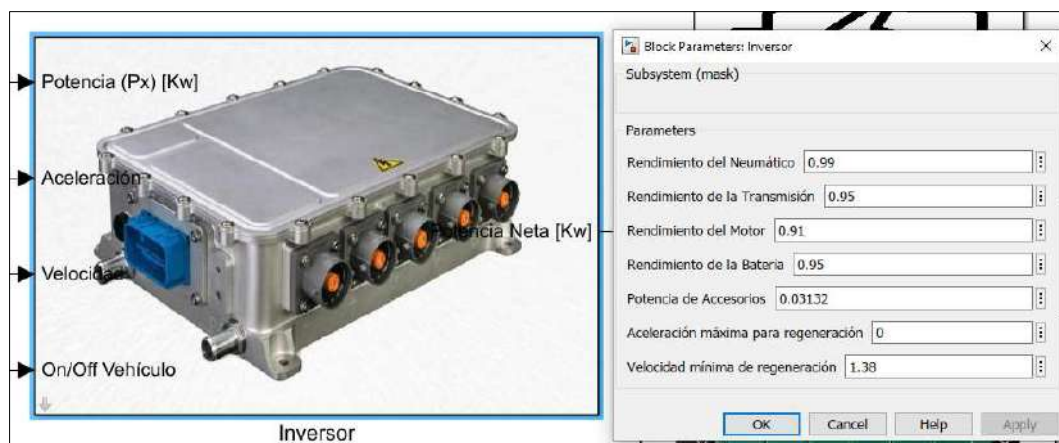
**Tabla 3-5:** Valores numéricos de las características del vehículo

Parámetro	Valor	Fuente
Relación de transmisión final	3,615	(Tenelema Chano y Sánchez Lema 2021)
Coefficiente aerodinámico (cd)	0,42	(Bayas Guevara y Rosero Sánchez 2015)
Masa total	355kg	(Crespo & Sánchez, 2022)
Área frontal	0,567m <sup>2</sup>	(Bayas Guevara y Rosero Sánchez 2015)
Densidad del aire	0,843kg/m <sup>3</sup>	(Arias Cazco 2010)
Fuerza gravitacional	9,81m/s <sup>2</sup>	(Buenaño et al. 2022)

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.



En el bloque correspondiente al inversor, el cual tiene como entradas más importantes la potencia, la aceleración y la velocidad se colocaron como parámetros requeridos por el mismo las eficiencias correspondientes tanto a elementos mecánicos como rendimientos correspondientes a la batería. En el caso de la velocidad mínima de regeneración de energía del vehículo, según (SAE International, 2021, p.87) la regeneración de energía en el vehículo está permitida y sin alguna restricción cuando las velocidades del mismo son superiores a los 5km/h, o lo que es equivalente, 1,38m/s. Se colocó un valor de cero (0) en el parámetro de la aceleración máxima de regeneración debido a que previamente se conocía que dicho sistema se encontraba temporalmente inhabilitado. De esta forma, la salida de este bloque propició la información referente a la potencia neta del vehículo.



**Ilustración 3-13:** Parámetros del bloque del inversor

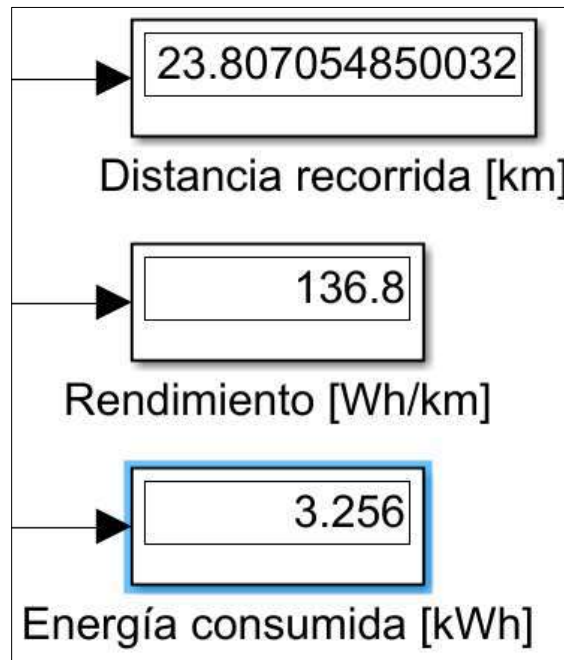
Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

**Tabla 3-6:** Valores ingresados en el bloque correspondiente al inversor

Parámetro	Valor	Fuente
Rendimiento del neumático	0,99	(Gao et al. 2017)
Rendimiento de la transmisión	0,95	(Oberg, Jones y Ryffel 2004)
Rendimiento del motor	0,91	(Golden Motor, 2023)
Rendimiento de la batería	0,95	(Rydh & Sandén, 2005)
Potencia de accesorios	0,03132kW	(Crespo & Sánchez, 2022)
Aceleración máxima para la regeneración	0	(Crespo & Sánchez, 2022)
Velocidad mínima de regeneración	1,38m/s (5km/h)	(SAE International, 2021)

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Finalmente, los valores obtenidos producto de la simulación en el modelo en base a la potencia creado en Simulink fueron los siguientes:



**Ilustración 3-14:** Resultados de la simulación

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

La simulación nos arrojó como resultado un consumo energético de 3,256 kWh, lo que se traduce en que la batería a implementar debía contar con características iguales o mayores para poder cubrir correctamente la demanda energética del vehículo.

Aunque en una competencia oficial SAE el evento de resistencia es el más extenso, no es el único desafío que los vehículos tienen que transitar, es decir, que el consumo energético del prototipo será mayor a lo reflejado en la simulación, ya que esta se centró únicamente en la prueba de mayor extensión y por ende representaba una mayor demanda. Es por esta razón que se estableció un factor de seguridad para evitar percances.

Se tomó en cuenta un factor de seguridad de un 45% adicional al valor de consumo simulado, debido a que el evento de resistencia es la prueba que presenta mayor rango de exigencia en una competición oficial; además, de esta forma se pueden evitar percances y alargar la vida útil de los acumuladores al momento de experimentar grandes descargas. A continuación se presenta el cálculo realizado en base a la información de (Chuquimarca Tandazo & Suin Uyaguari, 2017):

$$\text{Consumo energético final} = \text{Consumo energético simulado} * \text{Factor de seguridad}$$

$$\text{Consumo energético final} = 3,256kWh * 1,45$$

$$\text{Consumo energético final} = 4,7212kWh$$

Así, el valor del consumo energético tomado en cuenta para la selección de los acumuladores sería de 4,7212kWh.

### 3.7.6. Selección de batería

Como se pudo ver en el apartado anterior, según la simulación realizada en el modelo elaborado en base a la potencia, se precisa de un acumulador que sea capaz de entregar 4,7212kWh para que el vehículo esté en condiciones de sortear un evento de resistencia en una competencia oficial.

Teniendo en cuenta esta cifra, antes de pasar a la selección de la batería, se revisaron las características del motor ubicado en el prototipo para tener una visión más precisa de las prestaciones con las que debía contar la misma. La siguiente tabla muestra las particularidades de este.

**Tabla 3-7:** Propiedades del motor instalado en el prototipo de Fórmula SAE

<b>Modelo</b>	HPM-10kW—High Power BLDC Motor
<b>Voltaje</b>	48V
<b>Potencia nominal</b>	8kW-20kW
<b>Eficiencia</b>	91%
<b>Resistencia de fase (mili ohmios)</b>	3.1/48V; 6.0/72V; 18.0/120V
<b>Inducción de fase (100 kHz)</b>	4uH/48V; 77uH/72V; 252uH/120v
<b>Velocidad</b>	2000-6000 rpm (adaptable)
<b>Peso</b>	17 kg
<b>Longitud</b>	170mm
<b>Altura</b>	206mm

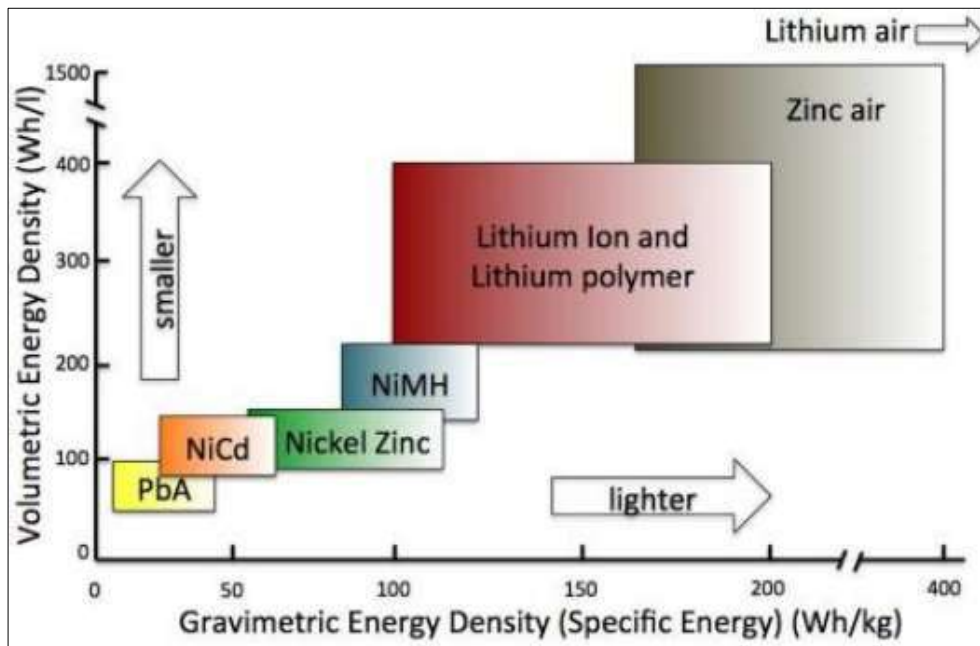
Fuente: (Golden Motor 2023).

Otro detalle a tener en cuenta eran las limitaciones energéticas con las que contaba el reglamento de la competencia, ya que, según este la potencia máxima del acumulador no debe exceder los 80kW y el voltaje máximo permitido para las baterías de alto voltaje no tiene que superar los 600 voltios en DC (SAE International 2021).

Una vez conocidas las prestaciones del motor con el que se contaba y las limitaciones técnicas estipuladas en el reglamento de la competición, se procedió a seleccionar la batería a adquirir.

### 3.7.6.1. Selección de la química de la batería

Si bien en el mercado se cuenta con una gran cantidad de opciones respecto a la química de un acumulador, no todas estas son aplicables a los fines que este trabajo requiere. Por esto, dos de los puntos clave que se tomaron en cuenta fue la energía específica que una batería puede proveer, ya que este rubro refleja la capacidad con la que esta almacena energía por unidad de peso; y el otro aspecto que se tuvo presente fue la densidad energética del acumulador, la cual se refiere a la cantidad de energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen.



**Ilustración 3-15:** Propiedades de las químicas existentes

Fuente: (Chuquimarca Tandazo & Suin Uyaguari, 2017)

La ilustración anterior indica algunas de las químicas usadas en la propulsión de vehículos. Según esta las baterías que mejores prestaciones ofrecen son aquellas que usan celdas de zinc aire y aquellas que usan celdas de ion litio. Las celdas de zinc aire poseen una buena energía específica, pero en la actualidad las geometrías que nos ofrecen sus celdas no son adaptables al propósito de este trabajo, ya que una de las formas más comunes existentes en el mercado son las de botón. En el caso de los acumuladores que cuentan con celdas de iones de litio tienen una buena energía específica, pero a diferencia de las anteriormente mencionadas, estas cuentan con una mayor cantidad de geometrías comerciales y una mayor accesibilidad en el mercado nacional.

Consecuentemente a lo anteriormente expuesto, se eligió a las celdas de litio para ser implementadas en la energización y propulsión del prototipo.

### 3.7.6.2. Selección del tipo de celda de ion litio

En lo referente a baterías que implementan celdas de ion litio se pueden encontrar composiciones químicas diferentes que tienen como base a este elemento. Es por esta razón y con el fin de poder establecer con claridad una química específica para el acumulador a implementar en el prototipo que se evaluaron los aspectos más importantes de las variantes de las celdas de ion litio. La siguiente tabla establece una comparación entre las características más importantes de las mismas y las puntúa de acuerdo a sus prestaciones y ventajas; siendo 1 muy poco favorable, 2 poco favorable, 3 medianamente favorable, 4 favorable y 5 muy favorable

**Tabla 3-8:** Contraste de las características a base de litio

Variante	Energía específica	Duración	Rendimiento	Seguridad	Costo	Disponibilidad	Suma total
Titanato de litio (LTO)	3	5	5	5	2	2	22
Óxido de litio y manganeso (LMO)	4	3	3	4	4	3	21
Óxido de litio-níquel-manganeso y cobalto (NMC)	5	4	4	4	4	2	23
Óxido de litio y cobalto (LCO)	5	3	4	3	4	2	21
Óxido de litio-níquel-cobalto y aluminio (NCA)	5	4	4	3	3	3	22
Fosfato de litio y hierro (LFP)	3	5	4	5	4	5	26

Fuente: (Buchman, 2016).

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Una vez establecidas algunas de las particularidades más importantes en lo que se refiere a las variedades de baterías a base de ion litio existentes, se procedió a realizar una observación minuciosa sobre qué tipo de química específica se iba a utilizar en el proyecto. A continuación, se presenta el análisis realizado en base a la tabla 3-8.

Las baterías del tipo titanato de litio (LTO) a pesar de que poseen una vida útil que está entre los 3000 y 7000 ciclos y están consideradas como una de las químicas más seguras dentro de las celdas a base de ion litio, no cuentan con una energía específica alta en relación a las demás variantes observadas.

Los acumuladores de óxido manganeso de litio (LMO) presentan una energía específica y valores nominales de voltaje por celdas considerablemente altos, en contraparte, la vida útil y el rendimiento de las mismas se presentan como insuficientes para los fines requeridos.

En cuanto a baterías de óxido de litio-níquel-manganeso y cobalto (NMC), estas poseen una no despreciable energía específica y un rango considerable de ciclos de vida. Por otra parte, presentan una pérdida de rendimiento cuando está sometidas a grandes periodos de cargas.

Las baterías de óxido cobáltico de litio (LCO) aunque poseen un rendimiento mediano y una potencia específica reducida ostentan una energía específica considerable, razón por la cual son usadas generalmente en aparatos electrónicos como teléfonos o cámaras digitales.

Respecto a los acumuladores de óxido de aluminio de litio níquel y cobalto (NCA), estos cuentan con una gran energía específica y una limitada potencia específica. Los inconvenientes de este tipo de química son, principalmente, su costo y su cantidad de ciclos de vida muy bajo.

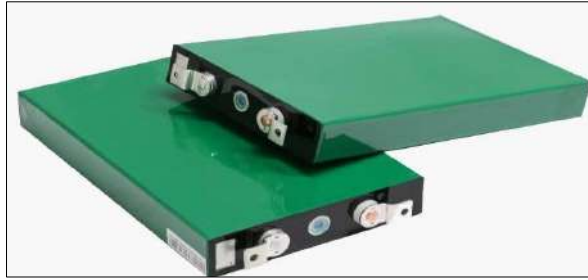
Finalmente, las baterías de fosfato férrico de litio o litio ferro fosfato (LFP) detentan valores respecto a la cantidad de ciclos de vida considerablemente altos, una energía específica significativa y una alta seguridad de operación.

En síntesis, en base al análisis de las prestaciones de los tipos de químicas de las baterías realizado, los acumuladores que presentan las mejores prestaciones para el equipamiento del prototipo de fórmula SAE son del tipo fosfato férrico de litio o litio ferro fosfato (LFP). Estas cuentan con una gran cantidad de ciclos de trabajo y son altamente seguras a la hora de su operación. Además, según cotizaciones previas al inicio del trabajo, este tipo de acumuladores se presentó de fácil adquisición y se ajustó a los requerimientos del mismo.

### *3.7.6.3. Selección de geometría de los módulos*

Uno de los puntos clave para la implementación de las baterías en el prototipo es la geometría de las celdas de las mismas, ya que, al tener un espacio limitado, es crucial su optimización para obtener el mayor provecho y evitar contratiempos.

Ya que lo que se busca con este trabajo es equipar con baterías al prototipo de Fórmula SAE propiedad de la carrera de ingeniería automotriz, los acumuladores fueron adquiridos en base a los requerimientos y análisis realizados. Como ya se mencionó, el tipo de química elegida para las celdas fue el fosfato férrico de litio o litio ferro fosfato y la geometría de las celdas, por accesibilidad en el mercado y cotizaciones previas, fueron las de los tipos prismáticos.



**Ilustración 3-16:** Celda prismática tipo LFP

Fuente: (Alithium 2021)

### 3.7.7. Selección de los módulos a implementar

Una vez tenida en cuenta tanto la química a implementar como la geometría que tendrían las celdas, se procedió a determinar la cantidad exacta con la que se debía contar para cubrir los requerimientos energéticos obtenidos por medio de la simulación.

Según el proceso de simulación en el modelo de potencia elaborado, el acumulador a elegir debía ser capaz de entregar 4,7212kWh para poder completar una prueba de resistencia estipulada en el reglamento. Teniendo en cuenta este valor y además considerando las características del motor instalado en el vehículo se determinó según la siguiente ecuación, proveniente del trabajo de (MARCEL DEKKER.INC 2003), que:

$$\text{Capacidad energética [Wh]} = \text{Capacidad de la batería [Ah]} * \text{Voltaje [V]} \quad (\text{Ec. 16})$$

Al ya tener el valor de la energía y el voltaje conocidos, despejamos la capacidad, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\text{Capacidad de la batería} = \frac{\text{Capacidad energética (Consumo energético final)}}{\text{Voltaje}}$$

$$\text{Capacidad de la batería} = \frac{4721,2\text{Wh}}{48\text{V}}$$

$$\text{Capacidad de la batería} = 98,36\text{Ah}$$

El valor del voltaje en el colocado en el cálculo anterior corresponde al voltaje máximo con el que el motor del vehículo puede trabajar.

El cálculo realizado entrega que la capacidad de la batería para poder satisfacer los requerimientos establecidos debe ser de 98,36Ah. Consiguientemente, las celdas elegidas deberán contar con una capacidad nominal aproximada o superior a este valor.

Después de una ardua exploración con una gran cantidad de proveedores sobre modelos de acumuladores que cumplan con las exigencias establecidas, se encontró un distribuidor el cual ofrecía módulos con la química y la geometría requeridos. Los módulos contaban con las siguientes prestaciones:

**Tabla 3-9:** Especificaciones de una celda LFP comercial

<b>Especificaciones individuales de la celda</b>	
<b>Capacidad nominal</b>	100Ah
<b>Tensión nominal</b>	3,2V
<b>Dimensiones (mm)</b>	Espesor 30, Ancho 135, Alto 220
<b>Peso</b>	1,87 kg
<b>Máxima corriente de carga continua</b>	50A
<b>Máxima corriente de descarga continua</b>	100A
<b>Corriente de descarga de pulso (25°C, 50% SOC 10S)</b>	300A
<b>Ciclos de descarga y carga (80% DoD)</b>	3000
<b>Temperatura de trabajo (descarga)</b>	-25°C a 60°C
<b>Temperatura de trabajo (carga)</b>	0°C ~ 45°C

Fuente: (Battery Depot 2023).

El formato en el que el proveedor entrega las baterías es en módulos de 8 celdas cada uno. Es decir, según los datos de la tabla 3-7, si se conectan en serie las celdas de cada módulo, cada uno cuenta con un voltaje nominal 25,6 V y 100Ah. De esta forma y tomando en cuenta la capacidad del motor, eran necesarias 16 celdas acopladas en serie o lo que se traduce a dos módulos en serie, para poder cumplir con el voltaje.

Concluyendo, referente al consumo energético establecido en la simulación, este también iba a estar cubierto con la elección de módulo realizada, ya que según la ecuación (Ec.16), la capacidad energética para cubrir el consumo nominal con la que los módulos debían contar era:

$$Capacidad\ energética\ [kWh] = Capacidad\ nominal\ de\ la\ batería\ [Ah] * Voltaje\ [V]$$

En este caso, para los valores referentes a la capacidad de la batería se usaron los 100Ah que posee cada módulo y para el voltaje 51,2 voltios ya que contaba con dos módulos colocados en serie para obtener un voltaje adecuado. Quedando de la siguiente forma:

$$Capacidad\ energética = 100Ah * 25,6V * 2$$

$$Capacidad\ energética = 5120Wh$$

$$Capacidad\ energética = 5,12kWh$$

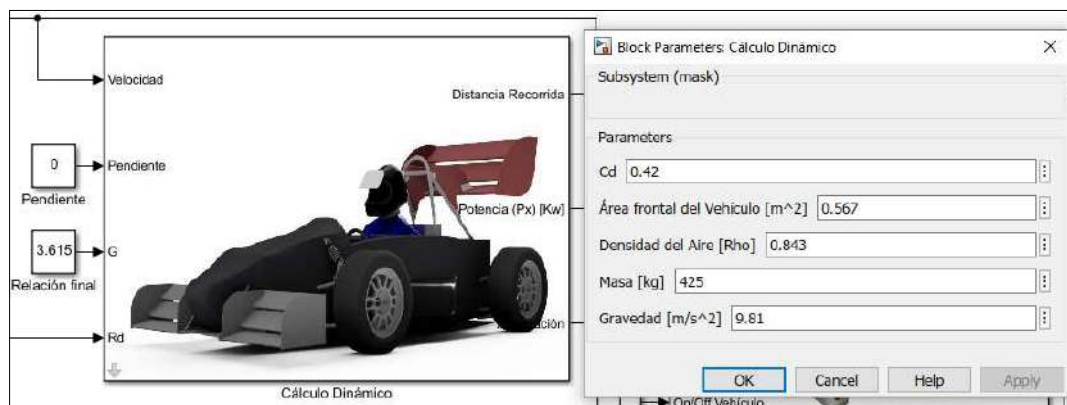


Posteriormente realizado el cálculo referente a la capacidad energética que los acumuladores módulos eran capaces de brindar, se pudo inferir que era cifra era la idónea para cumplir con las exigencias previamente trazadas.

### 3.7.8. Simulación de cantidad de consumo energético con baterías escogidas

Para finalizar; ya con las elecciones tanto de tipo de química, geometría y modelo de batería consumadas se procedió a ingresar los valores correspondientes a las características de dichos acumuladores elegidos en el modelo matemático previamente esbozado en Matlab para poder contar con una idea más clara referente al consumo energético al cual estarían expuestas. Para esto, los valores en la mayoría de los bloques se mantuvieron como previamente se habían colocado, salvo el caso del parámetro de la masa total del vehículo y el bloque correspondiente a las características del batería.

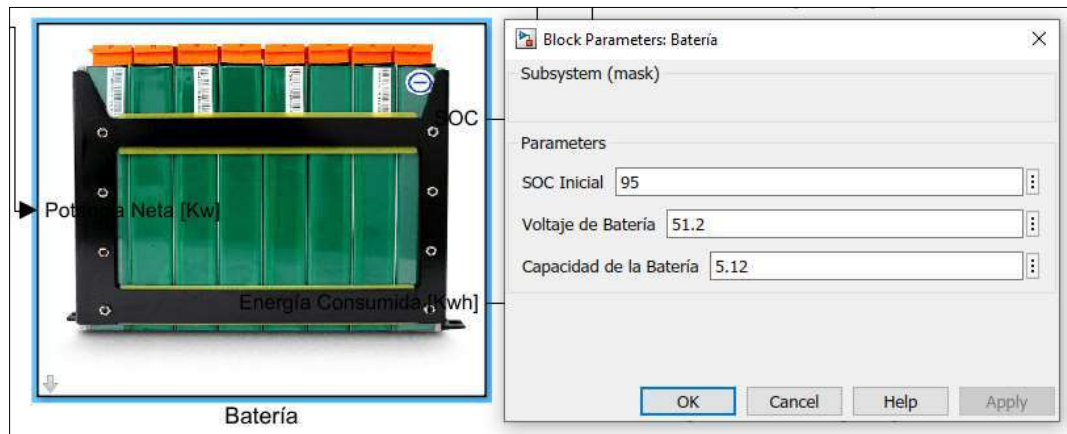
El valor de la masa total del vehículo fue modificado, ya que, una vez conseguidos los acumuladores a colocar en el vehículo, estos aumentarían la cifra de este parámetro. Además, se contó con el peso del piloto, que para fines de cálculo se estableció una cifra de 70 kilogramos.



**Ilustración 3-17:** Bloque respectivo al cálculo dinámico

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

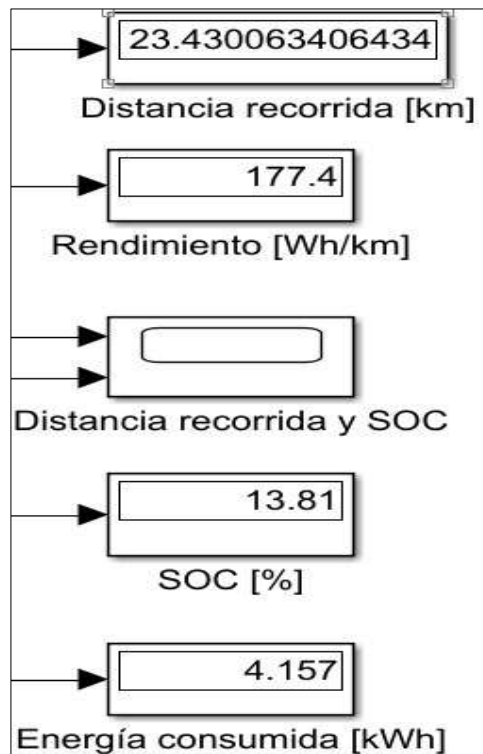
Para las características de los acumuladores fue necesario colocar las propiedades de los módulos adquiridos para conocer mediante el programa cómo se desempeñarían estos en las condiciones simuladas. De esta manera, el estado de carga inicial contó con un valor de 95%, el voltaje nominal de la batería un valor de 51,2V y 5,12kWh referente a la magnitud de la capacidad energética.



**Ilustración 3-18:** Parámetros de batería

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

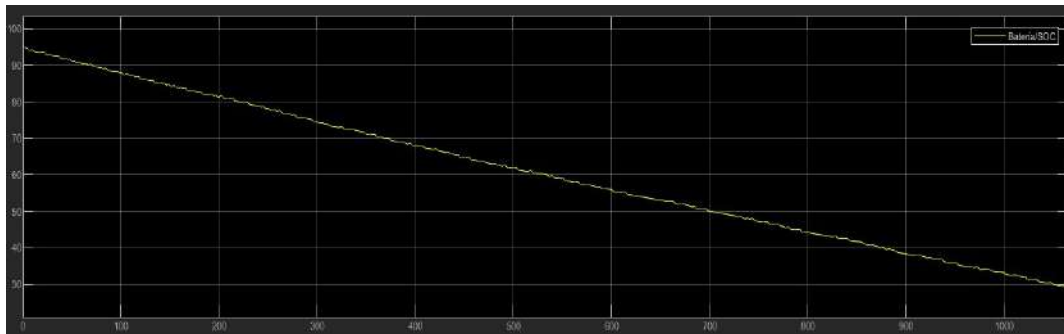
La operación de simular el consumo energético en pista se ejecutó nuevamente para conocer de forma más exacta la cantidad de energía que las baterías implementadas sería capaces de consumir una vez recorrida la pista. De este modo, el consumo final y los parámetros simulados teniendo en cuenta las prestaciones de los acumuladores adquiridos fueron:



**Ilustración 3-19:** Resultados finales de la simulación

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

En la ilustración 3-19 se pueden observar los parámetros obtenidos una vez concluida la simulación pertinente. En cuanto a la distancia recorrida no se observaron cambios ya que se contó con el mismo ciclo de conducción realizado en Optimum Lap. Respecto al estado de carga (SOC) al finalizar la simulación se observó que la cantidad restante del mismo era de 13,81%, lo que dio un buen indicio de que los acumuladores escogidos sortearían la prueba de resistencia finalizando con un porcentaje de carga prudencial.



**Ilustración 3-20:** Consumo de SOC en la simulación

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Concluyentemente, el dato más relevante al finalizar la simulación es el respectivo a la energía consumida en el transcurso de todo el ciclo. Se pudo contemplar en la ilustración 3-19 que la energía que consumida por el vehículo al transitar 22 pasadas por la pista fue de 4,157kWh, lo que se tradujo a que la capacidad energética de las baterías elegidas era suficiente para cubrir las exigencias a las que se habían expuesto.

### 3.7.9. Selección de Sistema de Gestión de la Batería (BMS)

Considerando las diversas opciones de BMS existentes y debido a la baja complejidad del vehículo en el que iba a implementar, se decidió el equipamiento de un único módulo para el correcto funcionamiento del sistema.

De esta forma, los BMS disponibles para el tipo de química con el que se contaba eran los siguientes:

**Tabla 3-10:** Variedades de BMS según su utilización

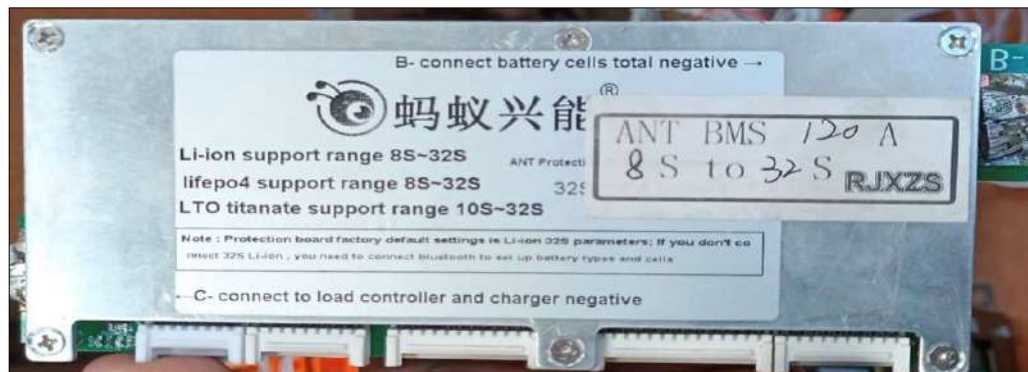
Modelo	BMS-ANT32S120A	BMS-ANT20S100A	BMS-LH4S150150LF 1	BMS-8S-100A	BMS-4S-100A

<b>Número de celdas a controlar</b>	8 a 32	8 a 20	4	8	4
<b>Corriente nominal</b>	120A	100A	150A	100A	100A
<b>Corriente pico</b>	300A	300A	300A	300A	300A
<b>Química de las celdas compatibles</b>	LiFePO4, NCM	Li-ion, LiFePO4, LTO	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4
<b>Comunicación</b>	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth	Bluetooth
<b>Rango de voltaje</b>	LiFePO4: 8 celdas a 32 celdas (24V a 117,34V pack de baterías) NCM: 7celdas a 32 celdas (24V a 136V pack de baterías)	Li-ion: 8 celdas a 20 celdas (3,2V): 8 celdas a 20 celdas LTO (2,4V): 10 celdas a 20 celdas	4 celdas, (12,8 pack de baterías)	LiFePO4 (2,8V – 3,7V)	4 celdas, (12,8 pack de baterías)
<b>Dimensiones</b>	183x72x25 (mm)	70x137x15 (mm)	315x115x10 (mm)	103x151x17 (mm)	105x215x18 (mm)

Fuente: (Battery Depot 2023).

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Se realizó un exhaustivo análisis de la tabla 3-8 para poder determinar con precisión el BMS a adquirir. Siguiendo los requerimientos previos de las baterías ya seleccionadas se contaba con 16 celdas LFP, las cuales colocadas en serie proveían 51,2V. Teniendo en cuenta este aspecto, el modelo de BMS elegido fue el BMS-ANT32S120A, ya que la cantidad de celdas máxima de las que puede realizar un control son 32 y la química para la cual se encuentra diseñado es para los sistemas que emplean fosfato de litio y hierro (LFP). Además, se tuvo en cuenta el posible aumento de un módulo más para acrecentar la autonomía del prototipo en un futuro.



**Ilustración 3-21:** BMS-ANT32S120A

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.10. Construcción del contenedor de baterías

Para la construcción del contenedor de la batería se inició consultando el reglamento para conocer las limitaciones y normas que se debían seguir durante este proceso.

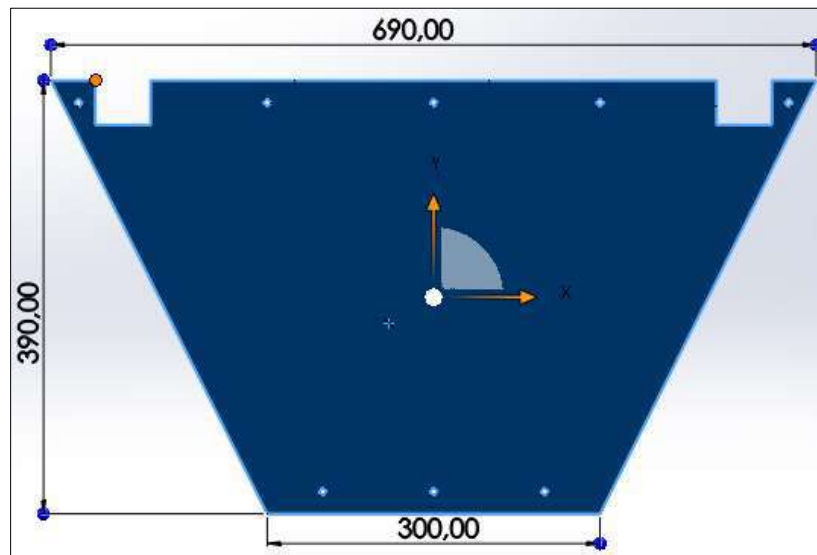
Según (SAE International, 2021, p.47), se establece que el contenedor de los acumuladores debe estar construido de un material no inflamable, el cual puede ser metal o un material no metálico que siga la norma UL94-V0, FAR25 o alguna norma aprobada en el ámbito de materiales no inflamables. Seguidamente, su estructura externa debe estar compuesta por un piso con espesor mínimo de 1,25 milímetros en el caso de ser construido en base a acero o de 3,2 milímetros si es elaborado en aluminio. En cuanto a las paredes, coberturas o tapas el espesor mínimo de construcción es de 0,9 milímetros para acero y 2,3 milímetros para aluminio. La unión de paredes y piso puede ser mediante soldadura, elementos de sujeción y adherencia; en el caso de los dos últimos métodos estos deben presentar una fuerza de unión similar a la de la soldadura. Para la sujeción del contenedor al vehículo, este debe ir sujeto a la estructura mayor del chasis y en dependencia del peso total del mismo tendrá un número mínimo de puntos de anclaje; en el caso de que cuente con un peso menor a 20 kilogramos los puntos de anclaje mínimos serán 4, si tiene un peso que se encuentra entre los 20 kilogramos y 30 kilogramos el número de puntos de sujeción serán 6, para un peso que esté entre los 30 kilogramos y 40 kilogramos dicho mínimo de puntos serán 8 y en el caso de que el peso total sea mayor a 40 kilogramos deberá tener mínimo 10 puntos de anclaje.



**Ilustración 3-22:** Zona de chasis para ubicación de contenedor de baterías

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Una vez que se establecieron los puntos de construcción más importantes en base a la norma, se realizó un diseño previo en el Software SolidWorks contando con las medidas del lugar en el que se iba a ubicar el elemento y las limitaciones de las que se dependía. Ya que el contenedor de las baterías estaría ubicado y sujeto a la estructura mayor del chasis, se proyectó que contaría con una base de placa metálica de 2 milímetros y unas paredes de lámina de acero de 0,90 milímetros que luego serían unidas mediante soldadura.



**Ilustración 3-23:** Diseño de la base del contenedor de baterías

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Como se mencionó anteriormente, la base del contenedor de las baterías se construyó de plancha de acero de 2 milímetros de espesor, un ancho de 690 milímetros y un alto de 390 milímetros. El proceso de obtención de la geometría observada en la ilustración 3-22 fue por medio de cortes con la ayuda de una cizalla hidráulica siguiendo las medidas estipuladas en el diseño. Para las paredes del elemento la plancha de 0,90 milímetros de espesor y una altura de 320 milímetros fue doblada por medio de una máquina de tal forma que esta se adapte al perfil de la base realizada.

Además, para el anclaje de los módulos se ejecutaron 6 agujeros en el piso del contenedor siguiendo los puntos de fijación con los que cada uno de estos traía de fábrica. Estos orificios, conjuntamente con los 8 puntos de sujeción del contenedor a la estructura del vehículo contaron con un diámetro de  $\frac{1}{4}$  de pulgada.

Finalmente, por medio de soldadura se procedió a unir ambas partes para concluir con el proceso de construcción del contenedor de las baterías.



**Ilustración 3-24:** Contenedor de baterías

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### ***3.7.11. Implementación de módulos en el vehículo de formula SAE***

#### ***3.7.11.1. Conexión en serie de los módulos***

Para poder realizar una conexión en serie de las celdas de cada módulo era necesario contar con elementos acorde a este fin. Para esto, se cortó piezas de dicho elemento con una medida específica que servirían como uniones entre los bornes de las celdas de cada módulo.

El proceso se inició con el corte de varios tramos de pletina con una medida de 4,5 centímetros. Esto con la ayuda de un flexómetro para una mayor precisión en las medidas.

Una vez con los elementos requeridos con las medidas deseadas y con la ayuda de un buril o broca, se procedió a realizar los agujeros de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Estos orificios son los encargados a mantener las placas de cobre sujetas a los bornes de las celdas de cada módulo mediante remaches de aluminio.

Finalmente, para la conexión en serie de los módulos se colocó cada placa uniendo el positivo de una celda con el negativo de la siguiente hasta culminar con la totalidad de las mismas y obtener un voltaje nominal final de 25,6V por cada bloque. Para la unión en serie de las dos unidades se colocó un cable para conectar el borne positivo final del primer módulo con el borne negativo inicial del segundo módulo, lo que nominalmente arrojaría un voltaje de 51,2V.



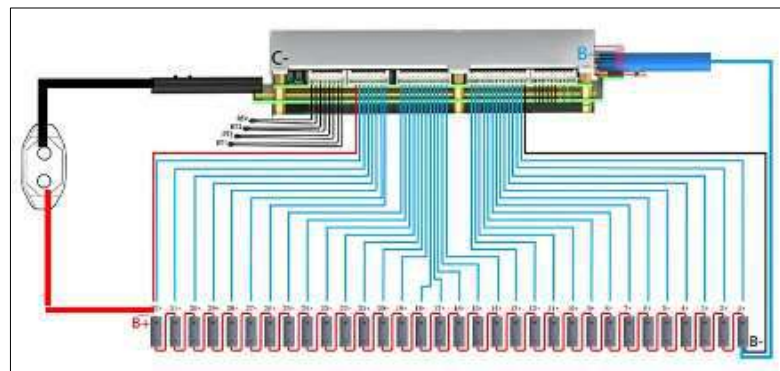


**Ilustración 3-25:** Proceso de conexión en serie de módulos

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.11.2. Colocación de cables dirigidos al BMS en las baterías

Respecto al proceso de ubicación del cableado que iba a estar conectado al Sistema de Gestión de la Batería (BMS), esta operación se realizó simultáneamente con la colocación de las placas de cobre en los bornes de cada una de las celdas. Para la buena consecución de esta etapa, la ilustración 3-26 muestra el diagrama que se utilizó para llevar a cabo de forma correcta las conexiones.



**Ilustración 3-26:** Diagrama de conexiones a BMS

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023

Para evitar confusiones, los cables contaban con una coloración específica según su ubicación en la batería. Siendo así, que el conductor rojo proveniente del mazo iba colocado en el borne positivo del pack completo, el conductor color negro se ubicó en el negativo saliente de la unión

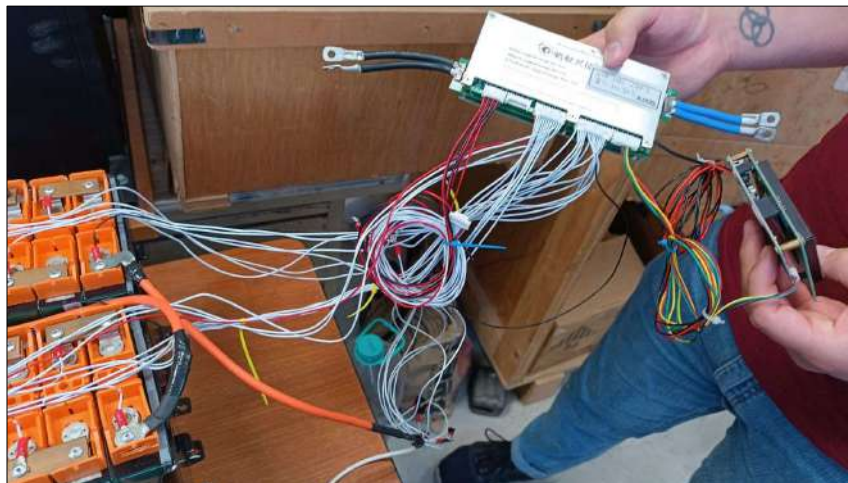


de los dos módulos y los cables de color blanco fueron situados uno en cada terminal negativo de todos los módulos restantes. La ilustración 3-27 detalla la distribución de cables mencionada.



**Ilustración 3-27:** Conexión en serie de módulos con sus respectivos cables para BMS

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.



**Ilustración 3-28:** Cableado conectado al BMS

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.11.3. *Instalación y anclaje de componentes en el chasis del prototipo*

Posteriormente a la ubicación de todas las celdas en serie y el cableado dirigido al Sistema de Gestión de la Batería simultáneamente, se colocó una plancha de acrílico de 3 milímetros de espesor en el piso de la caja contenedora para que cumpla la función de aislante y poder evitar fugas eléctricas y percances de cualquier tipo.

Habiendo afianzado el aislamiento en el elemento contenedor se procedió a asegurar las baterías en el suelo del mismo mediante pernos y tuercas de igual diámetro que los agujeros realizados. Una vez que el recipiente y el pack de acumuladores constituían un solo sistema, se ubicó este ensamble en la parte del chasis anteriormente mencionada y se sujetó al mismo por medio de pernos de  $\frac{1}{4}$  de pulgada de diámetro.



**Ilustración 3-29:** Sistema de contenedor y baterías montado en el vehículo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

### 3.7.11.4. *Unificación de los elementos parte del sistema de alimentación (conexión)*

Ya con la estructura contenedora ubicada y sujeta al chasis del prototipo, se llevó a cabo el proceso de conexión entre componentes del sistema eléctrico. Este procedimiento se realizó para lograr que las baterías, contenedor y BMS se conjuguen para formar un único conjunto que pueda ser extraído en caso de necesitar mantenimiento, reparación o recambio de componentes. Para la instalación del puerto hembra en la pared del contenedor se realizó un agujero en la misma y con la ayuda de pernos se sujetó el dispositivo para evitar el movimiento.

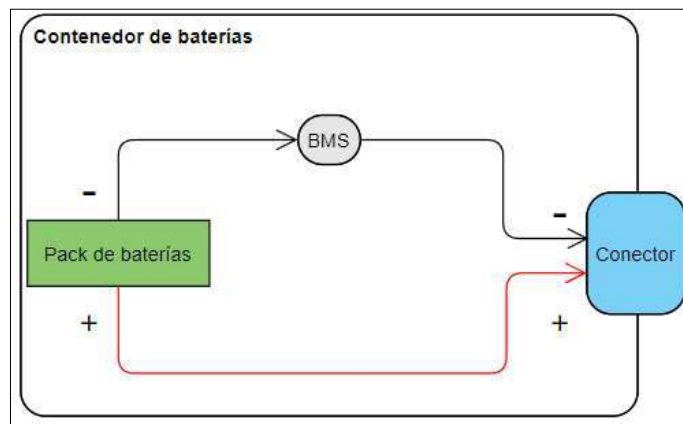


**Ilustración 3-30:** Puerto hembra en contenedor de baterías

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Se tuvo en cuenta que el BMS realiza su funcionamiento en base al negativo de la batería, siendo que sus dos extremos están ligados a una conexión únicamente con este polo. De esta forma, se inició uniendo el negativo del pack de baterías construido con uno de los extremos del BMS (extremo de color azul) y se dejó libre el otro punto para posteriormente unirlo con el puerto hembra instalado en la pared contenedor.

En el caso del polo positivo del pack, este se conectó directamente con el punto positivo del dispositivo hembra instalado.



**Ilustración 3-31:** Diagrama del sistema de alimentación

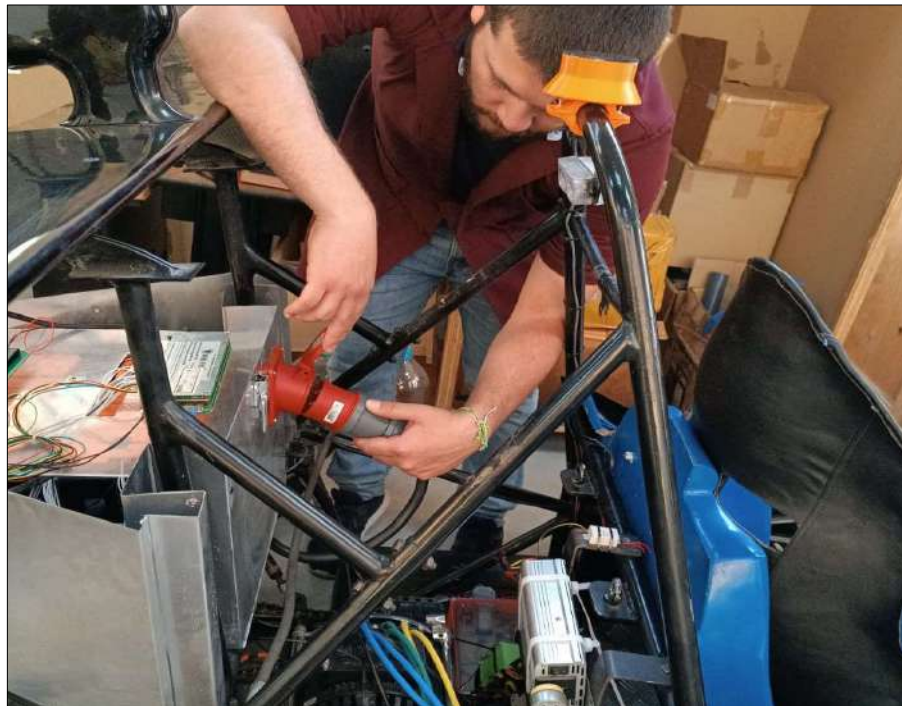
Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.



### 3.7.11.5. Conexión de sistema de alimentación con motor y sus componentes

Dado que el prototipo de Fórmula SAE del presente trabajo ha sido utilizado para la realización de varios algunos proyectos de grado previos, se tomó en cuenta la tesis de grado de (Tenelema Chano y Sánchez Lema 2021) para el armado del circuito eléctrico entre las baterías y el motor. De este modo, para la correcta instalación del sistema de alimentación en el vehículo, se utilizó el diagrama eléctrico que previamente había sido tomado como base para realizar la misma operación.

El Anexo A detalla con mayor claridad las uniones específicas que se ejecutaron para la correcta conexión entre todos los componentes que forman parte del sistema de tracción del prototipo.



**Ilustración 3-32:** Conexión entre contenedor de baterías y resto de componentes

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Pruebas a realizar

Posteriormente realizado todo el proceso de montaje y conexión de las baterías con su respectivo contenedor en el chasis del vehículo, se planteó ejecutar mediciones en los voltajes de los acumuladores, consumo de los accesorios y efectuar una prueba dinámica para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de alimentación.

##### 4.1.1. Pruebas de medición de voltajes

En lo referente a las pruebas de medición de voltaje, estas se realizaron con el vehículo detenido y sin que haya consumo de energía por parte de los dispositivos que conforman tanto el mismo sistema de alimentación como de aquellos que forman parte del sistema de telemetría del vehículo. De este modo se comprobará el voltaje individual de las celdas, el voltaje total de los módulos en serie y el voltaje total comprendido entre la unión serie de los dos bloques.

Estas pruebas sirven como verificaciones del estado tanto de las celdas, módulos como también del pack completo de baterías.

##### 4.1.1.1. Instrumentos usados para la medición de voltajes

Para la medición de voltajes se utilizó un multímetro digital, el cual permite conseguir valores precisos y claros.



**Ilustración 4-1:** Multímetro digital DT9208A

Fuente: (Cecomin Electronica 2023).

#### 4.1.2. Prueba de consumo de accesorios del vehículo

La prueba de consumo de accesorios consiste en realizar una medición del amperaje que el vehículo encendido está demandando en condiciones de reposo. Esto también es útil para conocer la cantidad de potencia que irá destinada a la alimentación de los mismos.

##### 4.1.2.1. Instrumentos usados para la medir el consumo de los accesorios del vehículo

Para la medición del consumo de los accesorios es necesario el uso de una pinza amperimétrica. La misma irá colocada en el negativo de la batería mientras el vehículo se encuentra en reposo. La cifra de amperaje que la pinza refleje será multiplicada por el voltaje total de las baterías y de esta forma se obtendrán cantidad de potencia que los accesorios con los que el prototipo está equipado son capaces de consumir.



**Ilustración 4-2:** Pinza amperimétrica UNI-T UT204+

Fuente: (ToolBoom 2023).

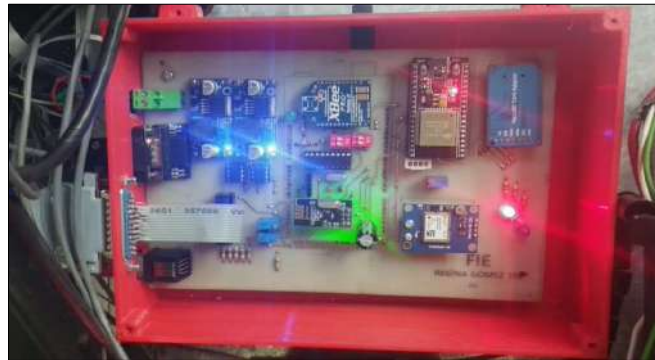
#### 4.1.3. Prueba de funcionamiento en movimiento

Tras la comprobación de los voltajes referentes al acumulador equipado y después de confirmar el buen estado del mismo, se proyectó la ejecución de una prueba de funcionamiento para cerciorarse del correcto movimiento del vehículo.

El ensayo consiste en recorrer progresivamente la ruta trazada para poder medir los consumos que el vehículo realiza mientras se encuentra en movimiento.

#### 4.1.3.1. Herramientas empleadas para la obtención de datos

Para la consecución de los datos referentes a consumos efectuados por el vehículo en movimiento se hizo uso de las herramientas de telemetría con las que este previamente contaba. Todos los valores obtenidos serían captados y almacenados por los instrumentos propios del sistema para luego ser extraídos en forma de hoja de cálculo para su posterior análisis.



**Ilustración 4-3:** Sistema de telemetría

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

#### 4.1.3.2. Ruta a circular por el vehículo

El recorrido planteado para ejecutar la prueba de movimiento por el prototipo de Fórmula Student se ubicó en el parqueadero de la Carrera de Ingeniería Automotriz en terreno propiedad de la institución.

Se efectuaron varias pasadas por el trayecto para de esta forma estar en capacidad de obtener registros puntuales sobre la cantidad de consumo realizado por el vehículo.



**Ilustración 4-4:** Ruta establecida para prueba

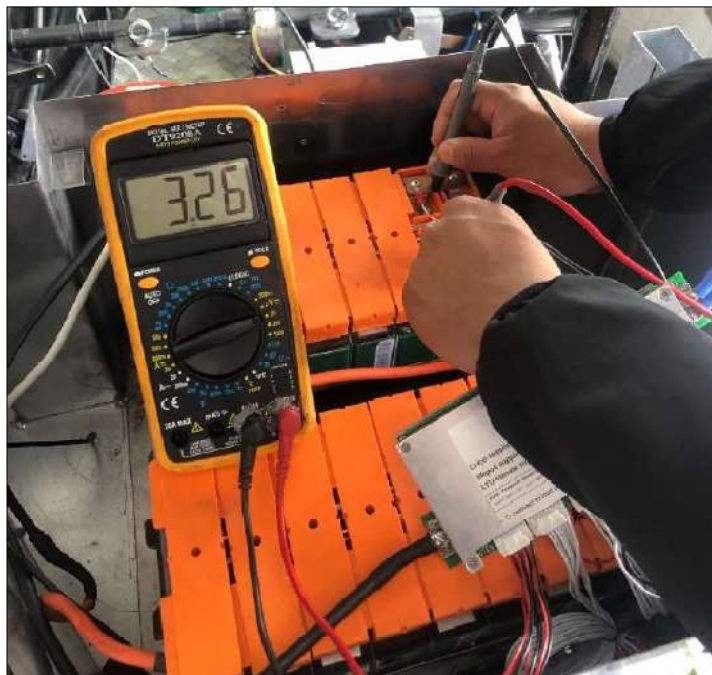
Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

## 4.2. Análisis de resultados

### 4.2.1. Resultados de pruebas de medición de voltaje

#### 4.2.1.1. Medición del voltaje individual de las celdas

Después de haber montado el paquete de baterías en el contenedor y este a su vez en el prototipo se procedió a la medición de voltajes individuales para comprobar el estado de los acumuladores y los voltajes que cada celda poseía.



**Ilustración 4-5:** Medición de voltaje de una celda de la batería

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Como se puede observar en la ilustración 4-1 el voltaje de una celda del pack de baterías es de 3,26V, lo que indica que el estado de esta es óptimo y cuenta con toda su capacidad.

Siguiendo con el proceso y para tener una idea más clara del estado individual de los componentes del acumulador, se verificó mediante el multímetro la diferencia de potencial de la parte restante de las celdas.

Se tomó como primera celda aquella ubicada como el negativo global de la batería y como última aquella perteneciente al positivo general. De esta forma, el primer módulo cuenta con el negativo del pack y segundo cuenta con el positivo del pack completo.

Los valores de voltajes respectivos se muestran en la siguiente tabla:



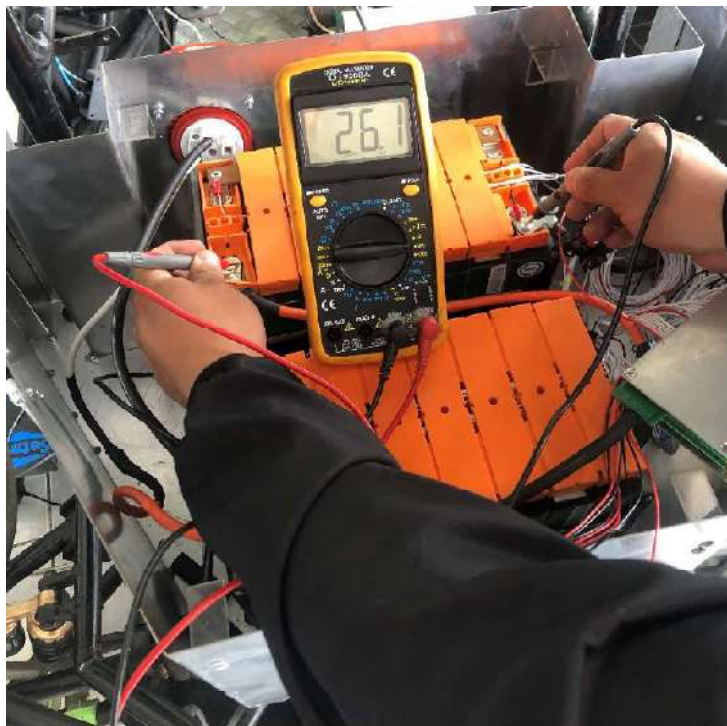
**Tabla 4-1:** Valores de voltaje de celdas

	N° de celda	Voltaje		N° de celda	Voltaje
<b>MÓDULO 1</b>	1	3,260	<b>MÓDULO 2</b>	9	3,260
	2	3,257		10	3,261
	3	3,258		11	3,259
	4	3,258		12	3,261
	5	3,257		13	3,257
	6	3,257		14	3,260
	7	3,257		15	3,260
	8	3,258		16	3,260

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

#### 4.2.1.2. Medición del voltaje de cada módulo

Una vez que los voltajes de las celdas de los módulos fueron comprobados se verificó la diferencia de potencial existente en cada bloque conectado en serie.



**Ilustración 4-6:** Valor de voltaje de un módulo

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Se puede visualizar en la ilustración anterior que el voltaje con el que los módulos, los cuales cuentan con todas sus celdas en serie, es de 26,1 voltios. Valor que nos da indicio de una buena condición del bloque.

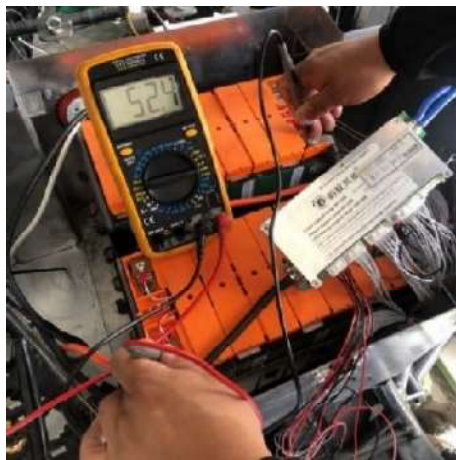
**Tabla 4-2:** Voltaje de los módulos individuales

	<b>Módulo 1</b>	<b>Módulo 2</b>
<b>Voltaje</b>	26,1	26,1

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

#### 4.2.1.3. *Medición del voltaje del pack de baterías*

Finalmente, en lo que respecta al control de voltajes, se efectuó la medición del voltaje total del pack de baterías para verificar que los procesos anteriormente realizados se cumplieron correctamente.



**Ilustración 4-7:** Voltaje total del acumulador

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

La ilustración 4-3 muestra que el voltaje total con el que cuenta el acumulador es de 52,4V, lo que ratifica el buen estado de este.

#### 4.2.2. *Resultados de prueba de consumo de accesorios*

Como ya se mencionó con anterioridad, esta prueba consistió en la colocación de una pinza amperimétrica en el polo negativo del pack de baterías con el vehículo encendido y en reposo. De esta manera, la ilustración 4-4 muestra el valor arrojado por el instrumento.



**Ilustración 4-8:** Valores de consumo de amperaje

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

La cifra censada por la pinza corresponde a un valor de 0,61 amperios de consumo, de esta forma y con el valor del voltaje total del pack de 52,4, se puede establecer bajo la fórmula de la potencia, que es igual a la multiplicación del voltaje por la intensidad, que el consumo de los accesorios del prototipo es de 31,96W.

Para fines del trabajo las unidades correspondientes a consumos energéticos deben ubicarse en kWh. Entonces, la potencia consumida multiplicada por unidad de tiempo y aplicada su correspondiente conversión según los múltiplos de la misma arroja como resultado un valor de 0,03196kWh.

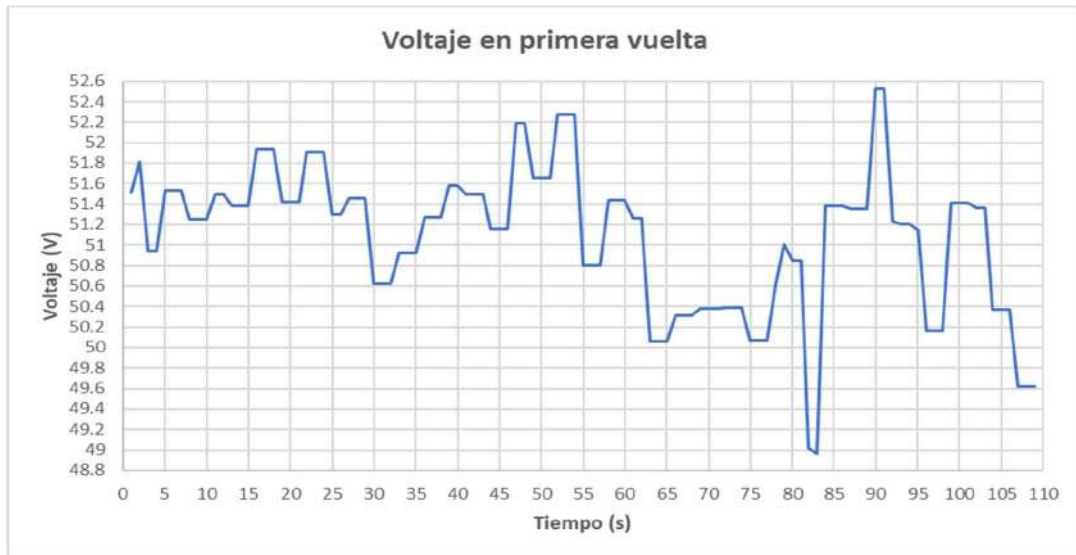
#### ***4.2.3. Resultados de prueba de funcionamiento en movimiento***

Para poder obtener conclusiones acertadas sobre el funcionamiento del vehículo, se analizaron los datos provistos por el sistema de telemetría de mismo.

Como ya se mencionó anteriormente, se realizaron varias pasadas en la ruta planteada para poder establecer un contraste entre los datos logrados. La duración total de estas pruebas fue de aproximadamente de 6 minutos y 30 segundos.

##### ***4.2.3.1. Primera vuelta por ruta***

El primer paso del prototipo por la ruta establecida tuvo una duración de aproximadamente 110 segundos hasta su consecución. La misma constó de un arranque del vehículo desde el reposo.

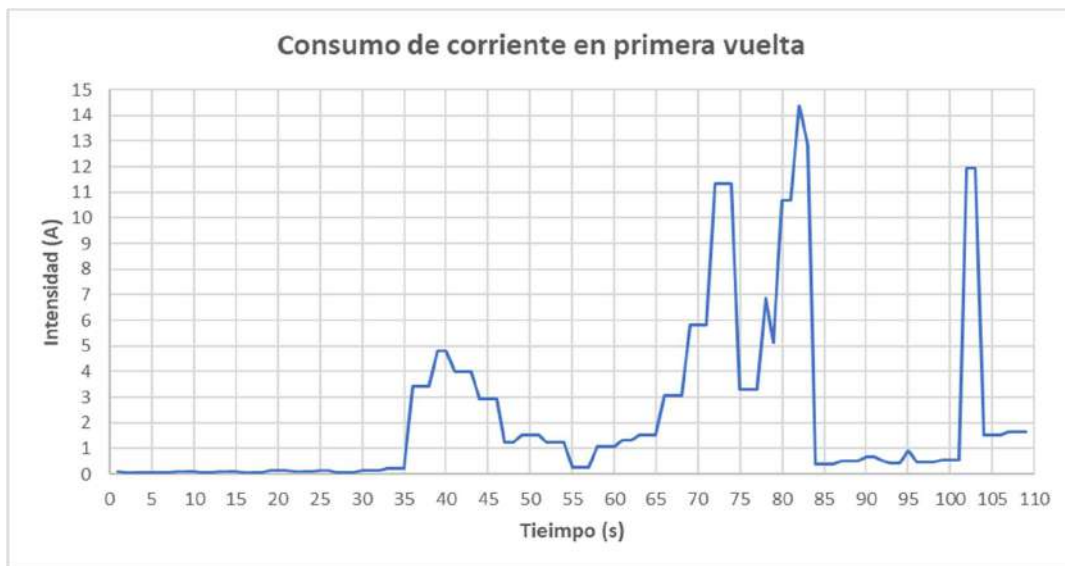


**Ilustración 4-9:** Voltaje de primera pasada por pista

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

En la ilustración 4-5 se puede observar que el voltaje en la primera pasada del vehículo por la ruta se mantiene dentro de un rango estable y con pocas fluctuaciones durante los primeros segundos. A partir de los 45 segundos del arranque del vehículo, los valores de voltaje empiezan a experimentar cambios más notables, pero manteniéndose dentro de un espectro entre los 48 voltios y los 53 voltios.

El voltaje mínimo experimentado en la primera vuelta por ruta es de 48,96 voltios, el máximo valor es de 52,53 voltios y el promedio es 51,09 voltios.



**Ilustración 4-10:** Consumo de corriente en primera pasada

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Los valores de consumo de amperaje que se representan en la lustración 4-6 reflejan que desde el segundo 35, aproximadamente, este valor empieza a ascender. Asimismo, basándose en las cifras que el sistema de telemetría arroja; el valor mínimo de consumo es de 0,06A, el promedio de consumo durante la vuelta es de 2,21A y el máximo corresponde a 14,39A.



**Ilustración 4-11:** Potencia consumida en primera pasada

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

La potencia consumida graficada en la ilustración 4-7 cuenta con un gráfico similar al referente al consumo de corriente de la primera vuelta por ruta. Estos datos reflejan un mínimo de 0,0031kW, un máximo de 0,71kW entre el segundo 80 y el segundo 85 y un promedio de consumo de corriente de 0,11kW.

#### 4.2.3.2. Segunda vuelta por ruta

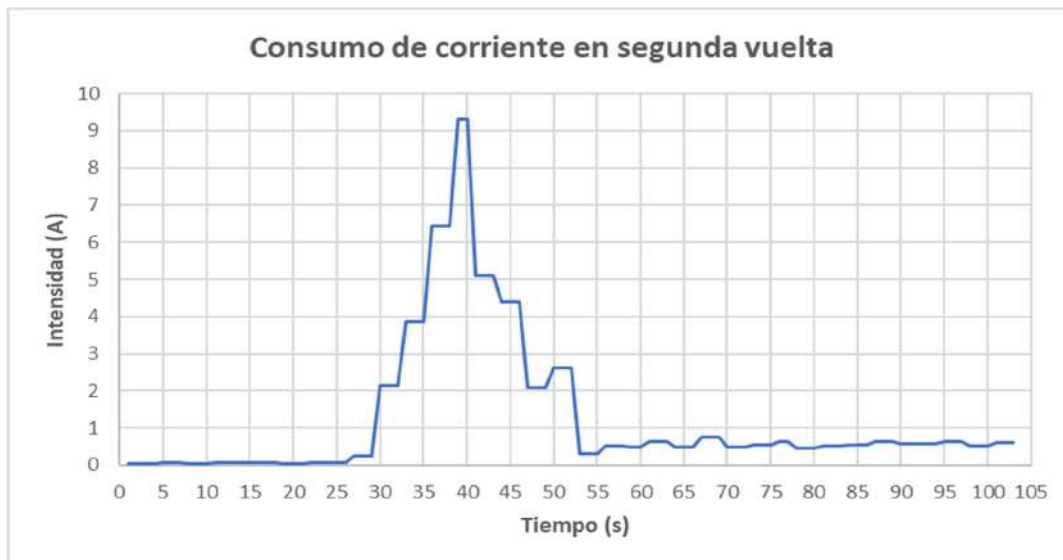
La segunda repetición del trazado establecido se completó con satisfacción en un tiempo aproximado de 1 minuto y 43 segundos (103 segundos). Nuevamente el prototipo partió desde el reposo.



**Ilustración 4-12:** Voltaje de segunda vuelta por pista

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Según lo que se observa en la ilustración 4-8, el voltaje en el segundo recorrido de la pista se mantiene regular durante el trayecto. En esta pasada el voltaje conserva un promedio de 51,21 voltios, un mínimo de 50,05 voltios y un pico máximo de 52,56 voltios que se mantiene por pocos segundos.



**Ilustración 4-13:** Consumo de corriente en segunda vuelta

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

En cuanto a los valores de consumo de corriente en la segunda vuelta por la pista se experimentó que el punto de mayor gasto se encontró en los primeros 40 segundos del trayecto. Según la telemetría del prototipo, promedio de intensidad es de 1,25 amperios, el máximo valor

de amperaje experimentado es de 9,30 amperios y la cifra mínima del mismo es de 0,04 amperios.



**Ilustración 4-14:** Potencia consumida en segunda pasada por pista

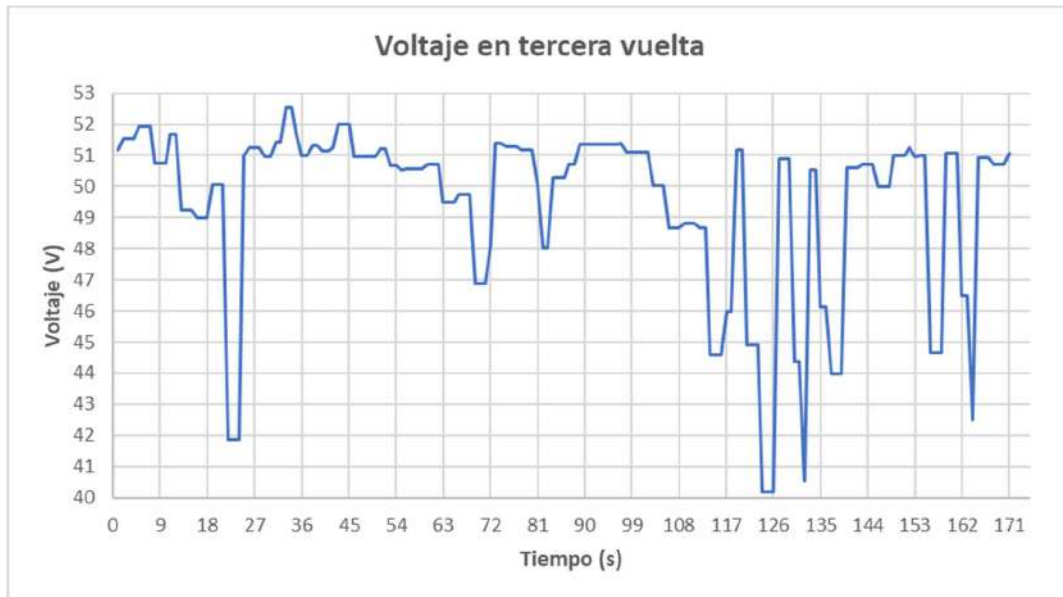
**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

Al igual que en el gasto de amperaje en este recorrido, el consumo de potencia experimenta su nivel más elevado en los primeros 40 segundos. La ilustración 4-9 obtenida de los datos provistos por el sistema de telemetría indica que el punto máximo de potencia corresponde a una cifra de 0,47kW, un nivel inferior con un valor de 0,002kW y un promedio estable de 0,06 kW.

#### 4.2.3.3. Tercera vuelta por ruta

En la tercera iteración del recorrido trazado el prototipo de Fórmula Student partió nuevamente desde el reposo. Esta tuvo una duración total de 2 minutos y 51 segundos. Los datos respectivos a los controles realizados por el sistema de monitorización se presentan a continuación.

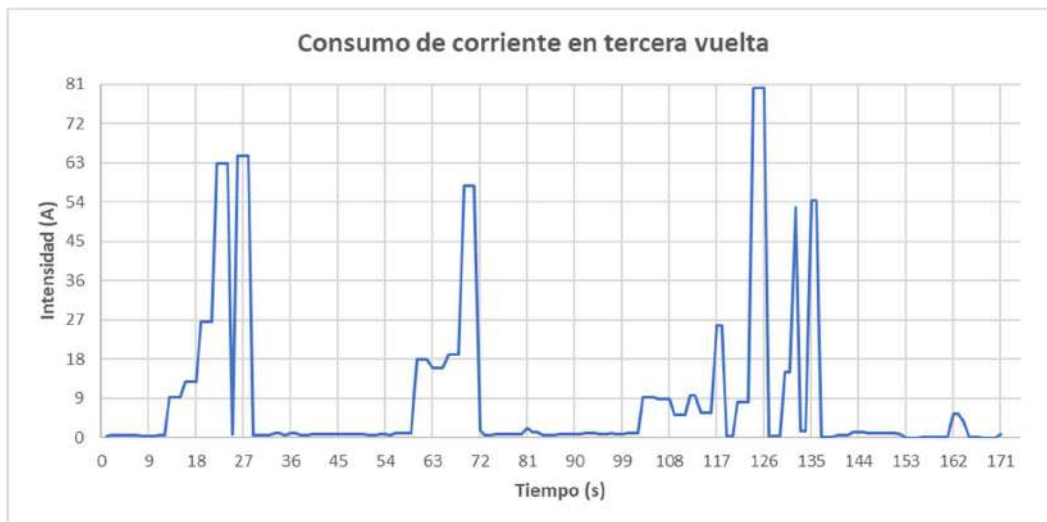




**Ilustración 4-15:** Voltaje de tercera pasada por ruta

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

La ilustración 4-10 revela que el voltaje experimentó mayores fluctuaciones durante la tercera repetición de la ruta, siendo que, según los datos provistos por los instrumentos de medición interna; el voltaje mínimo se ubica en los 40,17 voltios, el valor más bajo de toda la prueba. La cantidad correspondiente al valor máximo es de 52,54 voltios y el promedio es de 49,50 voltios.



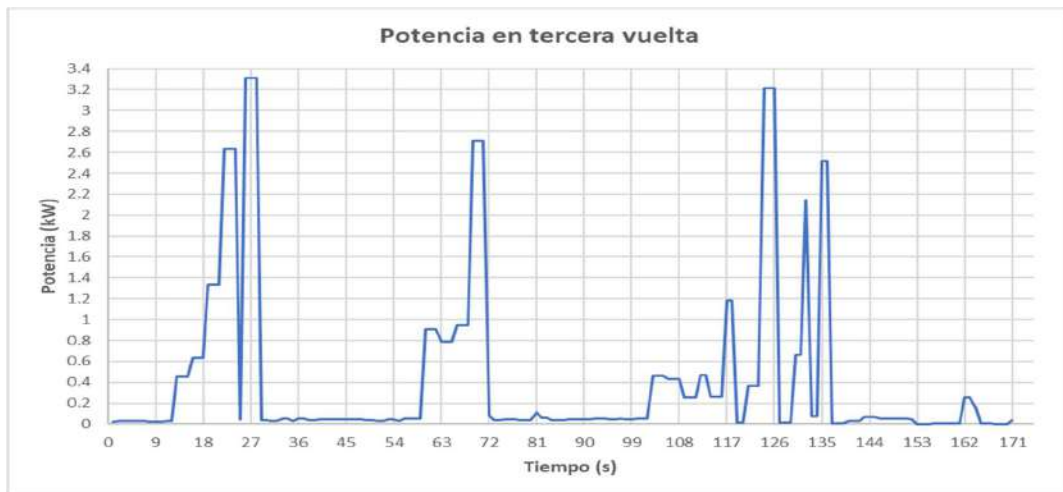
**Ilustración 4-16:** Intensidad consumida en tercera pasada por pista

Realizado por: Crespo M, & Sánchez R, 2023.

En el rubro del gasto de corriente, según la ilustración 4-11, se visualizan tres puntos altos de consumo, siendo el más alto el respectivo a 80,04 amperios. El valor promedio se encuentra en



9,18 amperios de aprovechamiento de la corriente y el valor mínimo corresponde a 0,03 amperios.



**Ilustración 4-17:** Potencia empleada en tercera vuelta por ruta

**Realizado por:** Crespo M, & Sánchez R, 2023.

De acuerdo con la ilustración 4-12, el momento de mayor consumo de potencia en durante los primeros 30 segundos del recorrido; en el cual se obtuvo un valor de 3,31kW. El segundo instante en la ruta en que se experimenta un consumo elevado está entre los 117 segundos y los 126 segundos y corresponde a un valor de 3,2kW. El promedio de los datos obtenidos es de 0,425kW y el valor más bajo de consumo de potencia es de 0,002kW.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

La búsqueda bibliográfica se concluyó con resultados satisfactorios ya que todas las fuentes consultadas contaron con una gran cantidad de información útil para la oportuna consecución del trabajo de titulación. De esta forma se pudieron cubrir tanto aspectos teóricos como técnicos relativos a los elementos que integran el sistema de tracción y alimentación del prototipo.

El dimensionamiento previo del acumulador a implementar en el vehículo que se realizó en el modelo elaborado en el software Matlab arrojó como resultado que este elemento debía contar con una capacidad energética de 3,256kWh. En base a este dato y colocando un factor de seguridad la energía consumida fue de 4,72kWh. Una vez conocida esta cifra se procedió a evaluar las opciones disponibles en el mercado y proceder a la adquisición de la unidad que mejor se adaptaba a las necesidades.

El segundo dimensionamiento efectuado mediante una nueva simulación en el modelo de Matlab con el fin de establecer concretamente la cantidad de energía que las baterías adquiridas iban a consumir en una prueba de resistencia dio a conocer que los valores fueron 4,157kWh para el consumo energético tras 22 vueltas por la pista esbozada y un estado de carga final del 13,81% al terminar el trayecto. Por lo que se concluyó que los módulos conseguidos son capaces de sortear un evento de resistencia en el marco de una competencia oficial.

Los elementos colocados en el sistema de alimentación del prototipo de Fórmula SAE pasaron por un riguroso periodo de análisis para poder ser implementados en el vehículo. De esta forma, se colocaron las partes que mejor se adaptaron al proyecto tanto económicamente como técnicamente para seguir el reglamento establecido.

Según las pruebas en movimiento realizadas con el prototipo se pudo establecer en base a los datos provistos por el sistema de telemetría de este que la cantidad máxima de corriente consumida en las mismas es de 3,31kW y el voltaje se mantiene en un rango promedio de 50,60 voltios en las tres vueltas ejecutadas. Esto indica que el prototipo cuenta con un sistema de alimentación idóneo para la puesta en marcha en una competición.

## **5.2. Recomendaciones**

Al momento de manipular elementos eléctricos como baterías o componentes del sistema de alimentación del prototipo, utilizar los implementos de seguridad adecuados para conservar tanto la integridad física de los operarios como el buen funcionamiento de las partes.

Precautelar, mediante comprobación de funcionamiento, que los elementos de protección y seguridad del sistema eléctrico se encuentren operativamente funcionales al momento de ejecutar tanto reacondicionamientos como pruebas en movimiento para evitar percances de cualquier tipo.

Para aumentar la autonomía del prototipo de Fórmula SAE se recomienda equipar dos módulos adicionales a los ya provistos. Esto, para sortear pérdidas de rendimiento y evitar que los procesos de carga del sistema de alimentación sean recurrentes.

En caso del equipamiento adicional de módulos, analizar las capacidades del motor actual y considerar el posible cambio del mismo por una unidad de mayor potencia, para así aumentar y mejorar el rendimiento del vehículo en pista.

Evitar que los niveles de estado de carga (SOC) de los acumuladores sean inferiores al 10% de su capacidad nominal, para que de esta forma se pueda precautelar la salud y la vida útil del sistema de alimentación.

Realizar trabajos de reacondicionamiento al sistema de freno regenerativo para alcanzar un correcto funcionamiento del mismo y de esta manera incrementar la autonomía del prototipo en condiciones de movimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

**ALEGRE BUJ, M.S.**, *Modelado del vehículo eléctrico e híbrido paralelo por medio de matlab/simulink y planificación de estaciones de carga mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos*. [en línea], Disponible en: <http://espacio.uned.es/fez/view/tesisuned:IngInd-Msalegre>.

**ALITHIUM**, ALITHIUM. [en línea]. [consulta: 10 julio 2023]. Disponible en: <https://alithium.org/>.

**ARIAS CAZCO, P.J.**, *Diseño de un sistema de secado de madera para la empresa parquet «Los Pinos»* [en línea]. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/875/1/15T00462.pdf>.

**BATTERY DEPOT**, Alithium | Battery Depot. [en línea]. [consulta: 12 agosto 2023]. Disponible en: <https://batterydepot.com.mx/alithium/>.

**BATTERY UNIVERSITY, 2021. BU-205**: Types of Lithium-ion. [en línea]. [consulta: 9 julio 2023]. Disponible en: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.

**BAYAS GUEVARA, C.M. y ROSERO SÁNCHEZ, D.R.**, *Diseño y construcción de una carrocería de un vehículo de competencia fórmula "sae" en fibra de vidrio, para la Escuela De Ingeniería Automotriz* [en línea]. S.l.: Escuela Politécnica Superior de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4421>.

**BERGVELD, H.J., KRIUJT, W. & NOTTEN, P.**, *Battery Management Systems: Design by Modelling*. 1. Eindhoven: Kluwer Academic Publishers. ISBN 9789048161089.

**BUCHMAN, I.**, *Batteries in a portable world: A handbook on rechargeable Batteries for Non-Engineers*. 4. S.l.: Cadex Electronics Inc. ISBN 978-0-9682118-4-7.

**BUENAÑO, L., TORRES, H., FERNÁNDEZ, E. & COELLO, M.**, Ubicación de la infraestructura de carga mínima interurbana para vehículos eléctricos en la ruta Riobamba – Quito utilizando la metodología para el cálculo de la distancia máxima entre cargas rápidas (MDFC). ,

**CECOMIN ELECTRONICA**, Multímetro Digital con Termocupla DT9208A. [en línea].

[consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en:  
<https://www.electrocecomin.com/products/multimetro-digital-con-termocupla>.

**CHUQUIMARCA TANDAZO, S.R. & SUIN UYAGUARI, K.M.,** Diseño y desarrollo de una batería de alto voltaje para un vehículo de competencia tipo Formula SAE eléctrico. , 2017.

**CORDERO MORENO, D.G.,** *Metodología para minimizar el consumo de combustible en autobuses, que sirven rutas fijas, mediante la reconfiguración del tren motriz.* S.l.: Instituto Tecnológico y de estudios superiores de monterrey campus estado de México.

**ETXANDI-SANTOLAYA, M., CANALS CASALS, L., MONTES, T. & CORCHERO, C.,** Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. *Journal of Environmental Management*, vol. 338, ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/J.JENVMAN.2023.117814.

**FIORI, C., AHN, K. & RAKHA, H.A.,** Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, vol. 168, ISSN 0306-2619. DOI 10.1016/J.APENERGY.2016.01.097.

**FORMULA STUDENT GERMANY, FSG:** Concept. [en línea]. [consulta: 14 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>.

**GAO, Z., LIN, Z., LACLAIR, T.J., LIU, C., LI, J.M., BIRKY, A.K. & WARD, J.,** Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, vol. 122, ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/J.ENERGY.2017.01.101.

**GARCÍA GARCÍA, D.,** Qué son las baterías LFP: ventajas, inconvenientes y aplicaciones en la automoción. [en línea]. [consulta: 1 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/revision/que-baterias-lfp-ventajas-inconvenientes-aplicaciones-automocion>.

**GOLDEN MOTOR,** Axial Flux BLDC Motors: Powerful, Efficient, High Torque, Compact. [en línea]. [consulta: 10 julio 2023]. Disponible en: <https://www.goldenmotor.com/>.

**HUGGINS, R.A.,** Lead-Acid Batteries. *Energy Storage*. S.l.: s.n., pp. 237-250. ISBN 9781441910240.

**JIANG, J. & ZHANG, C.,** *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*. S.l.: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd. ISBN 978-1-118-41478-1.

**JULIEN, C., MAUGER, A., VIJH, A. & ZAGHIB, K.,** *Lithium Batteries: Science and Technology*. S.l.: s.n. ISBN 9783319191089.

**KOROBKOV, D.S. & UFIMTSEVA, O. V.,** Choice of the Traction Motor for the Electric Racing Car “Formula Student”. *Procedia Engineering*, vol. 150, ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/J.PROENG.2016.07.004.

**MARCEL DEKKER.INC,** Electrochemical Energy Storage. En: H.. KIEHNE (ed.), *BATTERY TECHNOLOGY HANDBOOK*. 2. New York: Expert Verlag GmbH, pp. 25-124. ISBN 0-8247-4249-4.

**MEAH, K., HAKE, D., SMITH, A., HOCK, P. & WALSH, A.,** Design and Implementation of the Software and Hardware System for a Formula SAE Electric Vehicle. *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2020*, DOI 10.1109/IEEEIC/ICPSEUROPE49358.2020.9160530.

**NAZRI, G.-A. y PISTOIA, G.,** 2003. *Lithium Batteries*. S.l.: s.n. ISBN 9781402076282.

**BERG, E., JONES, F.D. & RYFFEL, H.H.,** *Machinery 's Handbook*. 27. New York: Industrial Press, Inc. ISBN 0831127007.

**PELLETIER, S., JABALI, O. & LAPORTE, G.,** Battery Electric Vehicles for Goods Distribution: A Survey of Vehicle Technology, Market Penetration, Incentives and Practices. *Cirrelt*, no. September,

**PETROVIC, S.,** *Battery Technology Crash Course*. S.l.: s.n. ISBN 9783030572686. 2021.

**PISTOIA, G.,** *Batteries for portable devices*. Roma: s.n. ISBN 0444516727.

**POWER BIGBADMOLE,** Batería Li NMC. [en línea]. [consulta: 1 agosto 2023]. Disponible en: <https://power.bigbadmole.com/es/akkumulyatory/batarei/li-nmc.html>.

**ROMÁN HERNÁNDEZ, M.,** Pilas recargables: Efecto memoria. [en línea]. Disponible en:

<https://www.emezeta.com/articulos/pilas-recargables-efecto-memoria#axzz1prCATpwJ>.

**ROSSMANEK, P.**, Automotive engineering education in Germany with the racing formula SAE. *ATZ worldwide*, vol. 107, no. 11, DOI 10.1007/bf03224789.

**RYDH, C.J. y SANDÉN, B.A.**, Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. *Energy Conversion and Management*, vol. 46, no. 11-12, ISSN 0196-8904. DOI 10.1016/J.ENCONMAN.2004.10.003.

**SÁNCHEZ CRIADO, C.**, Un viejo tipo de batería, la de hidruro de níquel-metal, renace para competir con las de ión-litio - Movilidad Eléctrica. [en línea]. [consulta: 4 agosto 2023]. Disponible en: <https://movilidadelectrica.com/un-viejo-tipo-de-bateria-la-de-hidruro-de-niquel-metal-renace-para-competir-con-las-de-ion-litio/>.

**TENELEMA CHANO, A.D. & SÁNCHEZ LEMA, J.M.**, *Implementación de un sistema de tracción eléctrica aplicado al vehículo prototipo fórmula sae de la carrera de Ingeniería Automotriz*. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

**TOOLBOOM**, Pinza amperimétrica UNI-T UT204+. [en línea]. [consulta: 17 agosto 2023]. Disponible en: <https://toolboom.com/es/digital-clamp-meter-uni-t-ut204plus/>.

**WANG, Q., JIANG, B., LI, B. & YAN, Y.**, A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2016.05.033.

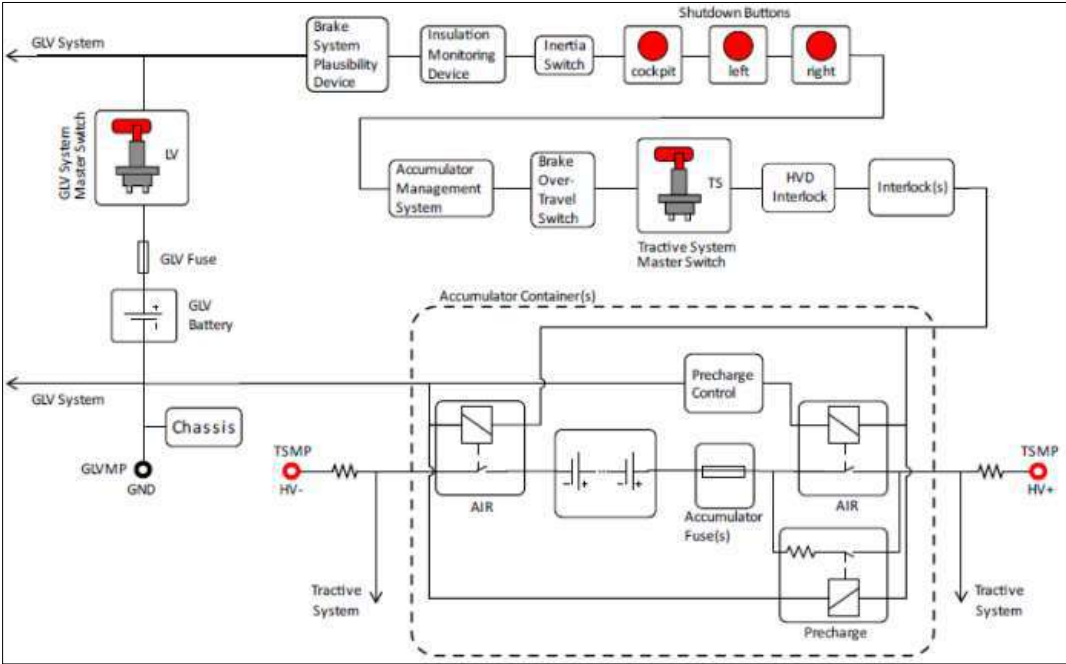
**WEICKER, P.**, *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*. Norwood: s.n. ISBN 9781608076598.

**WONG, J.Y.**, *Theory of ground vehicles*. 3. S.l.: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9786021018187.

**ZHAO, Q. fang, YU, Y. hui, OUYANG, Q. sheng, HU, M. yi, WANG, C., et. al.** Surface modification of LiFePO<sub>4</sub> by Coatings for Improving of Lithium-ion Battery Properties. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 17, no. 11, ISSN 1452-3981. DOI 10.20964/2022.11.31.

ANEXOS

ANEXO A: CIRCUITO CORRESPONDIENTE AL SISTEMA DE PROPULSIÓN







epoch

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 07 / 02 / 2024

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Marco Antonio Crespo Asanza – Roberth Andrés Sánchez Morocho
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Facultad de Mecánica
<b>Carrera:</b> Carrera de Ingeniería Automotriz
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Automotriz
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2080-DBRA-UPT-2023

